VISIT…

Листвин А.В. Листвин В.Н.

Рефлектометрия оптических волокон

Москва • 2005

ББК 32.889

Книга представляет собой пособие для инженерно-технических работников, занимающихся строительством и эксплуатацией волоконно-оптических линий связи. В ней приведены характеристики оптических импульсных рефлектометров, характеристики современных типов одномодовых оптических волокон и описаны методики измерения основных параметров волокон, определяющих качество линии связи. Четкий и понятный язык, большое количество иллюстраций и численных примеров делает ее полезной не только для опытных специалистов, но и для студентов только начинающих знакомится с этой технологией.

А. В. Листвин, В. Н. Листвин
РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН
Л63 – М.: ЛЕСАРарт, 2005. 208 с, ил.
Лицензия ИД № 01913 от 1 июня 2000 года

ISBN 5-902367-03-4

© 2005 А. В. Листвин, В. Н. Листвин
© 2005 Издательство «ЛЕСАР*арт*», оформление

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 5
Предисловие авторов 6
ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ 7
ПОТЕРИ СВЕТА В ОДНОМОДОВЫХ ВОЛОКНАХ 7
§ 1. Типы оптических волокон 7
§ 2. Спектр оптических потерь 9
§ 3. Потери в изогнутых волокнах 12
§ 4. Потери в месте соединения волокон 14
§ 5. Измерение потерь с помощью оптических тестеров 17
ОПТИЧЕСКИЕ ИМПУЛЬСНЫЕ РЕФЛЕКТОМЕТРЫ (OTDR) 19
§ 6. Принцип действия OTDR 19
§ 7. Назначение OTDR 21
§ 8. Типы OTDR 24
2 27
ХАРАКТЕРИСТИКИ OTDR 27
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ OTDR 27
§ 1. Динамический диапазон 27
§ 2. Оценка динамического диапазона 30
§ 3. Рабочий диапазон 33
§ 4. Отношение сигнал/шум 35
§ 5. Шумы в начале рефлектограммы 39
ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ 42
§ 6. Мертвые зоны для событий 42
§ 7. Мертвые зоны по затуханию 44
ПРИМЕНЕНИЯ OTDR 47
ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ 47
§ 1. Методика измерения длины волокна 47
§ 2. Инструментальные ошибки 48
§ 3. Типичные ошибки оператора 49
§ 4. Методические ошибки 52
§ 5. Разрешающая способность при измерении длины 55
§ 6. Определение места повреждения волокон 57
ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ 60
§ 7. Измерение полных и погонных потерь 60
§ 8. Измерение потерь в сростках волокон 62
§ 9. Влияние мертвых зон 65
§ 10. Ошибки из-за флуктуации диаметра модового пятна 66
§ 11. Двухсторонний анализ рефлектограмм 68
§ 12. Измерения на двух длинах волн 70
§ 13. Метод шлейфа 72

§ 14. Применение согласующего кабеля 74
ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ 76
§ 15. Методика измерения коэффициента отражения 76
§ 16. Ошибки измерений 79
§ 17. Измерение обратных потерь (ORL) 83
ИЗМЕРЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОН 86
МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКОН 86
§ 1. Разрывная прочность 86
§ 2. Статическая усталость 90
§ 3. Долговечность волокон 92
ИЗМЕРЕНИЕ НАТЯЖЕНИЯ ВОЛОКОН 96
§ 4. Метод бриллюэновской рефлектометрии 96
§ 5. Бриллюэновский анализатор (BOTDA) 99
§ 6. Бриллюэновский рефлектометр (BOTDR) 100
§ 7. Точность измерения натяжения волокна 102
Приложение А 106
А1. Сварные соединения волокон 106
А.2. Ответвители 2х2 108
А.3. Оптические разъемы 112
А.4. Оперативное подключение волокон 116
А.5. Технология оконцовывания волокон 119
ПРИЛОЖЕНИЕ Б 121
Спецификации современных моделей оптических рефлектометров 121

Предисловие

Уважаемый читатель, перед Вами вторая книга специалистов компании "Вэлком". Она продолжает тему детального описания физических процессов в оптических волокнах, которой была посвящена первая книга, и раскрывает перед нами мир измерений физических параметров современных оптических сетей.

В настоящее время все большее внимание уделяется вопросам увеличения пропускной способности и надежности сетей передачи данных, а значит и вопросам измерения качества систем передачи. Основная доля магистральных сетей построена по технологии волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Все большее развитие получает и технология пассивных оптических сетей PON (Passive Optical Networks). Оптика находит применение в построении локальных вычислительных сетей и высокоскоростных сетей уровня Metro. Все перечисленные технологии предъявляют как общие, так и специфические требования тестирования. Основным методом измерения физических параметров подобных сетей является рефлектометрия.

Данной тематике посвящено немало работ в западной и отечественной литературе. Вместе с тем, до настоящего момента существовала насущная необходимость в книге, которая объединяла в себе вопросы проведения практических измерений и описание факторов влияющих на получение корректных результатов.

В книге подробно рассмотрены современные типы оптических рефлектометров и их основные характеристики, такие как динамический и рабочий диапазон, пространственное разрешение. Описаны основные понятия – релеевское рассеяние, мертвая зона по затуханию и событию, приведены методики измерения длины оптической линии, потерь и коэффициента отражения, а также типичные ошибки оператора. Практическую ценность представляет раздел с описанием критериев выбора необходимого динамического диапазона рефлектометра в зависимости от требуемого разрешения, величины потерь на событие и общего затухания линии.

В целом, перед нами прекрасное практическое пособие, ориентированное на широкий круг специалистов и, в первую очередь на тех, кто занимается вопросами построения и эксплуатации современных оптических линий связи.

А.И. Бегишев
Руководитель сектора телекоммуникаций
Контрольно-измерительное оборудование
Agilent Technologies

Предисловие авторов

Рефлектометрические измерения являются важнейшей составной частью работ, проводимых при монтаже и эксплуатации волоконно-оптических линий связи, так как с их помощью определяется качество этих линий. Цель этой книги состоит в том, чтобы рассмотреть основы теории и практики измерений основных параметров волоконно-оптических линий связи, которые в настоящее время выполняются с помощью оптических импульсных рефлектометров (OTDR). Эти вопросы обычно рассматриваются в описаниях к оптическим рефлектометрам, где основное внимание уделяется изложению методов измерений. В этой же книге акцент сделан на объяснение физики, лежащей в основе этих методов. Не все формулы, фигурирующие в тексте, строго выводятся, так как их вывод часто затрудняет восприятие материала, но зато они сопровождаются подробными комментариями.

Строительство линий связи ведется в России неослабевающим темпом, охватывая при этом новые регионы и привлекая к строительству новых специалистов зачастую мало знакомых с волоконно-оптической техникой. Как показывает опыт, наибольший интерес вызывают вопросы, связанные с проведением оптических измерений, особенно тех, которые выполняются с помощью рефлектометров. Для того чтобы разобраться в основах рефлектометрических измерений, необходимо не только понимание того, как функционирует оптический импульсный рефлектометр, но и понимание специфики распространения света в одномодовых волокнах.

Книга явилась результатом курса лекций по волоконной оптике, читавшихся в течение нескольких лет строителям оптических линий связи. Наша предыдущая книга: «Оптические волокна для линий связи» была посвящена применению оптических волокон. В этой же книге рассмотрена специфика оптических измерений в линиях связи. Как и предыдущая, эта книга может служить справочным пособием для специалистов, которые хотели бы пополнить и систематизировать свои знания в волоконной оптике. Материал изложен, как мы надеемся, достаточно просто и может быть хорошим введением для тех, кто только начинает знакомиться с этой технологией. Авторы книги - сотрудники компании «ВЭЛКОМ», представляющей на российском рынке телекоммуникационное оборудование, волокна и кабель ведущих зарубежных и отечественных производителей.

Компания «ВЭЛКОМ»
Тел. (095) 935-76-16, факс (095) 935-76-15
E-mail: vl@velcom.ru, http://www.velcom.ru

1

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

В настоящее время контроль качества волоконно-оптических линий передачи осуществляется путем измерения в них потерь света. Для этих целей разработана аппаратура, позволяющая находить не только полные потери в линии (оптические тестеры), но и распределение потерь и коэффициентов отражения вдоль линии (оптические рефлектометры). В локальных линиях, учитывая их малую протяженность (1...2 км), можно ограничиться измерением полных потерь с помощью оптических тестеров. Этот метод измерения потерь является эталонным, так как в нем измеряется непосредственно доля мощности, поглощенная в волокне (метод облома волокна и метод вносимых потерь). Однако с помощью оптических тестеров можно измерить только полные потери в линии передачи и при этом необходимо еще иметь доступ одновременно к обоим концам волокна, что сложно осуществить в магистральных линиях.

В магистральных линиях стремятся, чтобы регенерационные участки линии получились максимально длинными, что позволяет уменьшить число ретрансляторов и снизить стоимость обслуживания линии. При этом существенно возрастают требования к надежности линии и величине потерь в ней. В этом случае недостаточно измерить полные потери в линии, а необходимо измерить еще потери в строительных длинах оптических кабелей, в сростках волокон и в оптических разъемах. Причем проводить эти прецизионные измерения приходится в полевых условиях. В настоящее время сделать это можно только с помощью оптического импульсного рефлектометра (OTDR – Optical Time Domain Reflectometer).

Контроль величины потерь в строительных длинах оптических кабелей и в сварных соединениях волокон важен не только для минимизации полных потерь в линии, но ещё и потому, что он позволяет, хотя и косвенно, судить о надежности линии, срок службы которой около 25 лет. Потери могут превысить заданное значение на каком-нибудь участке линии, чаще всего, из-за избыточного натяжения волокон в кабеле, наличия дефекта в сварном соединении волокон или сильного изгиба волокон в муфте. В этом случае нельзя быть уверенным в том, что этот участок линии не будет в дальнейшем быстро деградировать и не возникнет аварийная ситуация в результате обрыва волокон в линии. Все такие участки должны быть выявлены и исправлены ещё на стадии монтажа линии.

В этой главе мы приведем основные сведения о потерях света в одномодовых волокнах и об устройствах для измерения потерь: оптических тестерах и оптических импульсных рефлектометрах (OTDR).

Раздел I

ПОТЕРИ СВЕТА В ОДНОМОДОВЫХ ВОЛОКНАХ

§ 1. Типы оптических волокон

Оптическое волокно представляет собой двухслойную цилиндрическую кварцевую нить, состоящую из сердцевины и оболочки. Оболочка покрыта защитным слоем из акрилатного лака. Сердцевина легирована германием, поэтому её показатель преломления больше, чем у оболочки. Свет распространяется в сердцевине волокна, испытывая полное внутреннее отражение на границе с оболочкой. Он проникает в оболочку на глубину

порядка длины волны, т.е. на глубину много меньше её толщины и, следовательно, не взаимодействует с покрытием из акрилатного лака. Это покрытие необходимо для защиты кварцевой оболочки от механических повреждений и воздействия воды.

Волокна делятся на два основных типа: многомодовые и одномодовые. Для всех типов волокон, применяемых в линиях связи, диаметр кварцевой оболочки имеет стандартный размер 125+1 мкм. Номинальный диаметр сердцевины у многомодовых волокон 50 или 62.5 мкм. Диаметр сердцевины у одномодовых волокон может меняться в зависимости от типа волокна в пределах 7..9 мкм (рис. 1.1). Нормируемым параметром у одномодовых волокон является диаметр модового пятна, величина которого зависит от типа волокна и рабочей длины волны и лежит в пределах 8..10 мкм. Отклонение диаметра модового пятна от его средней величины в соответствии с международным стандартом ITU-T Rec. G. 652 не должно превышать 10 %.

Рис. 1.1. Геометрические параметры одномодовых и многомодовых волокон

Все типы волокон, применяемые в линиях связи, по своим геометрическим параметрам настолько близки друг к другу, что при внешнем осмотре, если нет специальной маркировки, определить какой это тип волокна, практически невозможно. Многомодовые волокна применяются в локальных вычислительных сетях и частично в транспортных сетях на уровне доступа. Характеристики многомодовых волокон и области их применения в линиях связи достаточно подробно рассмотрены в нашей предыдущей книге «Оптические волокна для линий связи».

Одномодовые волокна применяются в транспортных сетях всех трех уровней: магистральном, уровне распределения и уровне доступа. Типы одномодовых волокон отличаются друг от друга только формой профиля показателя преломления (рис. 1.2) и, соответственно, дисперсионными характеристиками.

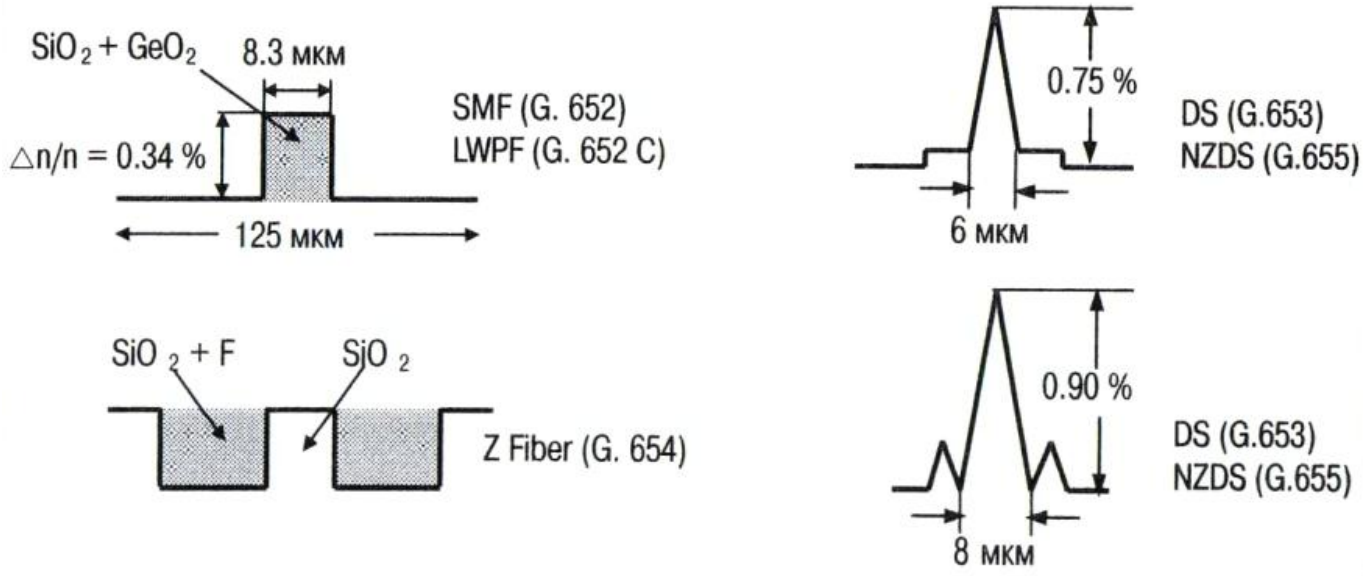


Рис. 1.2. Профили показателя преломления в одномодовых волокнах

Основные типы одномодовых волокон, применяемых в линиях связи, нормируются международными стандартами ITU-T Rec. G. 652...G. 655:

• G.652: волокна с несмещенной дисперсией (SM волокна) с длиной волны нулевой дисперсии и длиной волны отсечки в районе 1310 нм.

• G.653: волокна со смещенной дисперсией (DS волокна) с длиной волны нулевой дисперсии в районе 1550 нм и длиной волны отсечки в районе 1310 нм.
• G.654: волокна с несмещенной дисперсией (SM волокна) с длиной волны нулевой дисперсии в районе 1310 нм и длиной волны отсечки в районе 1550 нм.
• G.655: волокна со смещенной ненулевой дисперсией (NZDS волокна), обладающие малой дисперсией (0.1...6 пс/нм×км) в диапазоне длин волн 1530. ..1565 нм.
• G.656: волокна с ненулевой дисперсией для систем грубого уплотнения по длинам волн (CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexing).

Существует также несколько специальных типов одномодовых волокон применяемых в волоконно-оптических устройствах:
• Волокна для компенсации дисперсии (DC – Dispersion Compensating), применяемые в модулях компенсации дисперсии.
• Волокна с примесью редкоземельных элементов, применяемые в оптических усилителях, например, в EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier.
• Волокна, сохраняющие состояние поляризации излучения (PM – Polarization Maintaining), применяемые в гироскопах, поляризационных делителях и смесителях.
• Дырчатые волокна (Holey Fiber), применяемые в компенсаторах дисперсии, в оптических шнурах, в нелинейных элементах.

§ 2. Спектр оптических потерь

Зависимость потерь в кварцевых оптических волокнах от длины волны света представлена на рис. 1.3. В коротковолновой части диапазона потери ограничиваются релеевским рассеянием, а в длинноволновой части – инфракрасным поглощением. Релеевское рассеяние уменьшается с увеличением длины волны $\sim \frac{1}{\lambda^4}$, а инфракрасное поглощение увеличивается. Абсолютный минимум потерь приходится на λ = 1550 нм.

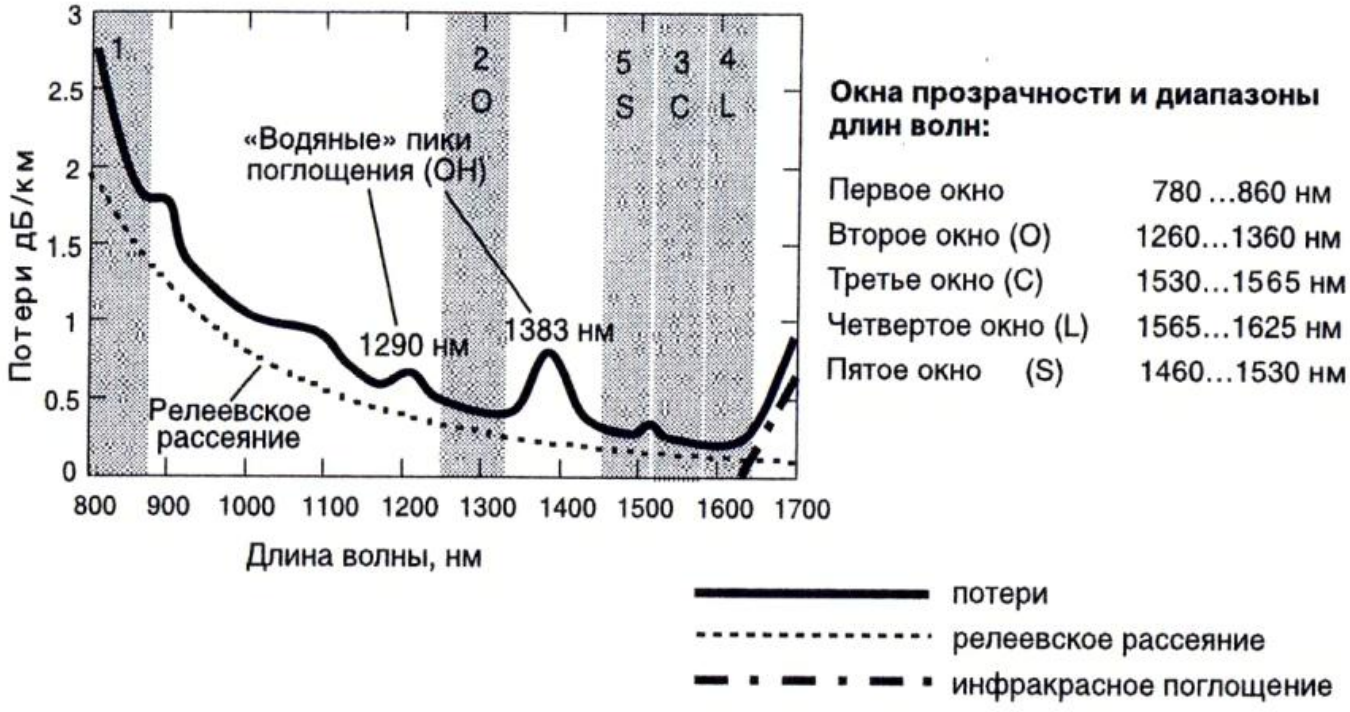


Рис. 1.3. Спектр потерь и положение окон прозрачности в кварцевых волокнах.

Основным типом волокон, применяемых в линиях связи, являются стандартные одномодовые волокна (G. 652). Для их обозначения используют несколько различных сокращений: NDSF – No Dispersion Shifted Fiber (волокно с несмещенной дисперсией), SF – Standard Fiber (стандартное волокно), SSMF – Standard Single Mode Fiber (стандартное одномодовое волокно). Наиболее распространенное обозначение: SM – Single Mode (одномодовое).

Для лучших образцов SM волокон потери на длине волны 1550 нм составляют 0.18...0.19 дБ/км (такие волокна поставляются по специальному заказу). Кроме того, SM волокна обладают более совершенными геометрическими параметрами и стабильным диаметром модового пятна, что позволяет достигать минимальных потерь в сростках таких волокон (типичное значение 0.02 дБ). Специфицированные значения потерь для SM волокон разных производителей приведены в таблице № 1.1

Таблица № 1.1. Специфицированные значения потерь в SM волокнах (2003 г.)

Производители	Alcatel	Corning	Hitachi	OFS	Samsung	Sumitomo	YOFC
	Потери дБ/км						
λ = 1310 нм	≤0.35	≤0.34	≤0.35	≤0.35	≤0.35	≤0.33	≤0.36
λ = 1550 нм	≤0.22	≤0.20	≤0.21	≤0.22	≤0.22	≤0.19	≤0.22

Как видно из таблицы № 1.1., величина погонных потерь в спецификациях на SM волокна приводится с точностью до второго знака после запятой. Это ограничение по точности вызвано неоднородностью распределения потерь вдоль волокна. Распределение потерь вдоль волокна находят по рефлектограмме длинного отрезка волокна. Для этого с помощью маркеров рефлектограмму разбивают на участки длиной порядка 1 км и измеряют величину потерь на каждом участке. Одна из таких реализаций приведена на рис. 1.4.

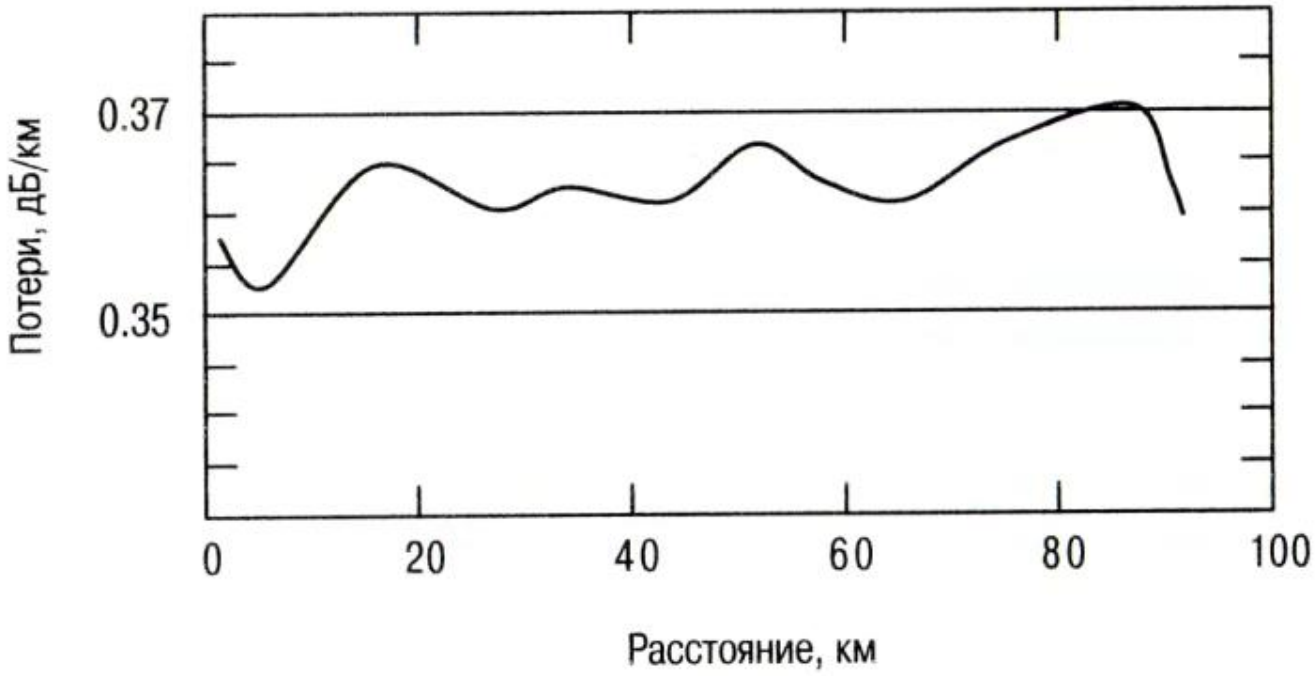


Рис 1.4. Распределение потерь вдоль волокна на λ = 1310 нм

Типичные гистограммы распределения потерь света в SM волокнах на λ = 1310 нм приведены на рис. 1.5. Данные компании Fujikura датированы 1997 г., а данные компании Hitachi 1998 г. и 2001 г. Характерно, что, если судить только по потерям, то волокна этих компаний практически идентичны.

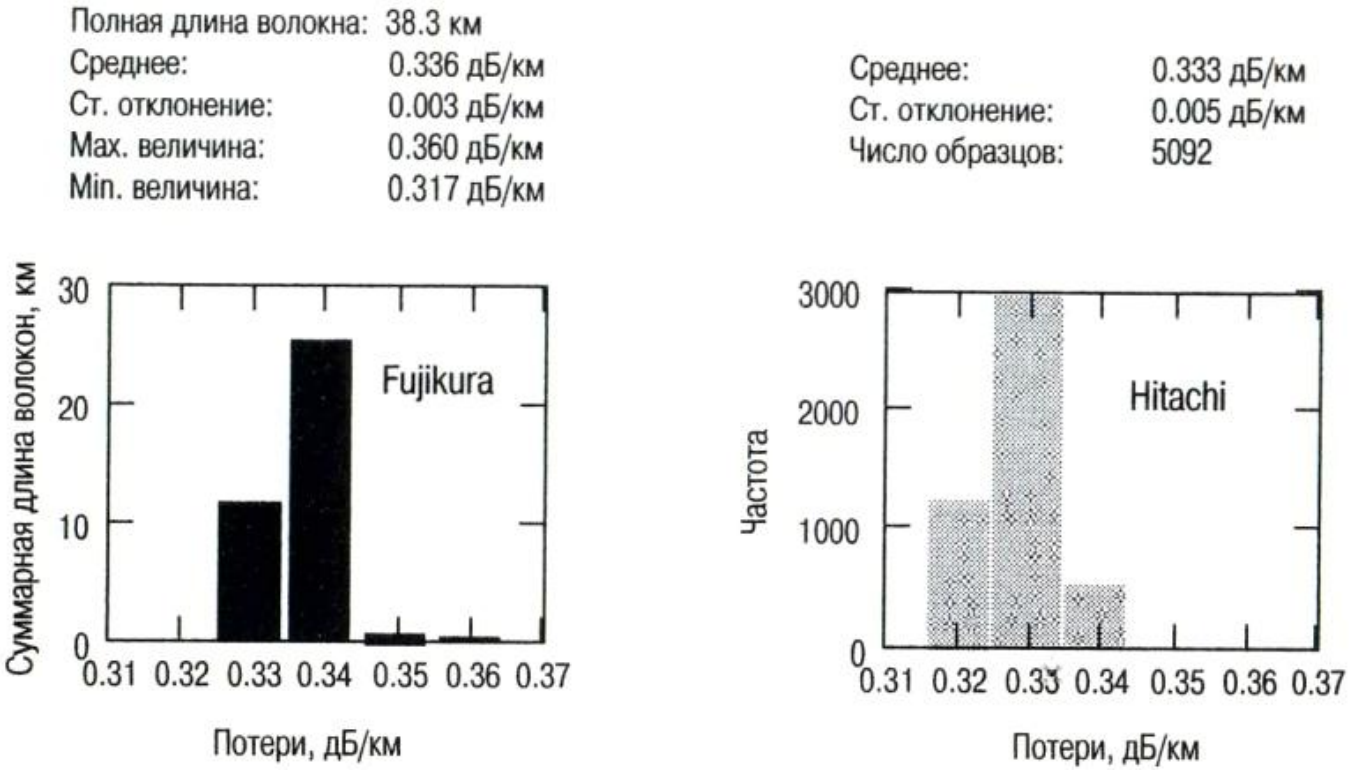


Рис. 1.5. Типичные гистограммы распределения потерь в SM волокнах на λ= 1310 нм

Кривая зависимости потерь от длины волны носит, в определенной мере, иллюстративный характер, так как для разных типов волокон и разных производителей величина потерь может различаться. Наиболее сильно могут различаться потери в «водяных» пиках на λ = 1290 нм и 1383 нм. Так в последних разработках SM волокон за счет улучшения технологии очистки от водяных паров удалось снизить потери в «водяном» пике (OH) на λ = 1383 ± 3 нм (рис. 1.6). Волокна типа LWPF (low water peak fiber) производятся несколькими компаниями: AllWave (OFS), SMF-28e (Corning), SMR (Pirelli).

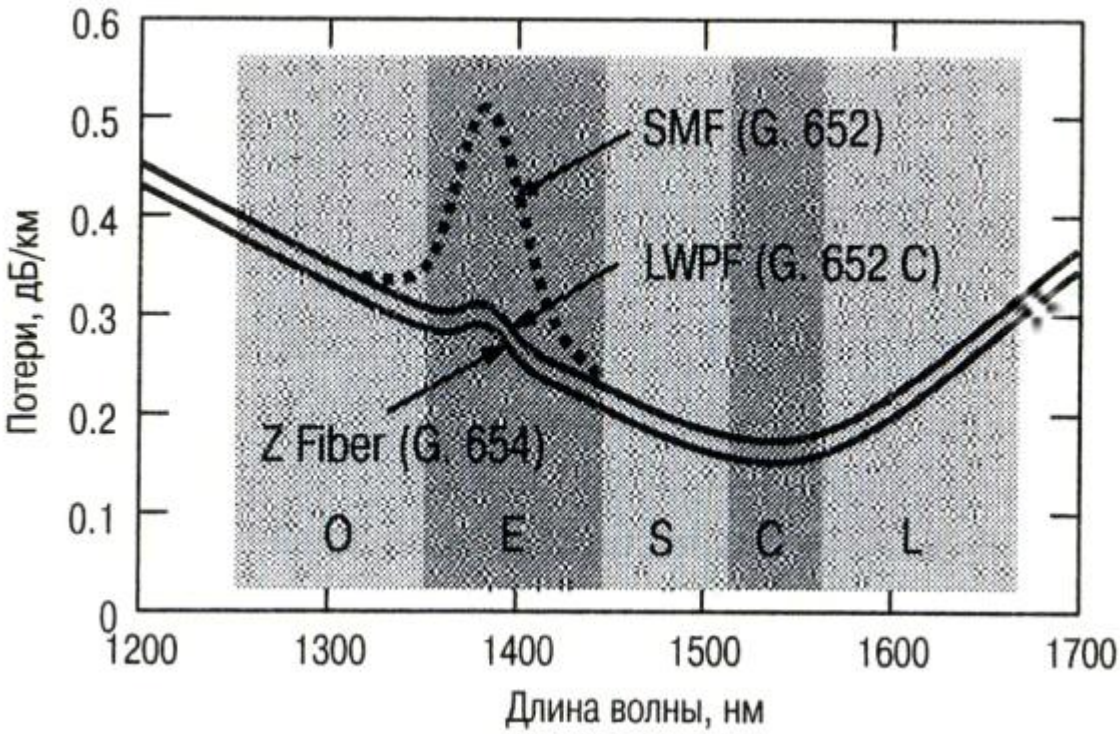


Рис. 1.6. Спектр потерь в SM волокнах (G. 652), в LWPF волокнах (G. 652 C), в волокнах с сердцевиной из чистого кварца Z Fiber (G. 654)

Волокна LWPF удовлетворяют требованиям Rec. G.652C и полностью совместимы с SM волокнами (G. 652). В LWPF волокнах потери в водяном пике уменьшены до величины

0.31 дБ/км, что меньше, чем потери во втором окне прозрачности на $\lambda = 1310$ нм (0.35 дБ/км). В результате появилась возможность создавать системы, работающие в пятом окне (S) прозрачности (1480...1520 нм), и в широком диапазоне длин волн (E) находящимся между вторым и пятым окном прозрачности (1360...1460 нм). Этот новый диапазон длин волн называют расширенным (Extended) и обозначают буквой E. Рабочие диапазоны длин волн и их наименования приведены в таблице № 1.2.

Таблица № 1.2. Спектральные диапазоны для одномодовых волокон

O - диапазон	1260...1360нм	Основной (Original)
E - диапазон	1360...1460нм	Расширенный (Extended)
S - диапазон	1460...1530нм	Коротковолновый (Short wavelength)
C - диапазон	1530...1565нм	Стандартный (Conventional)
L - диапазон	1565...1625нм	Длинноволновый (Long wavelength)
U - диапазон	1625...1675нм	Сверхдлинный (Ultra-long wavelength)

Длина волны отсечки в SM и LWPF волокнах лежит ниже 1310 нм, что обеспечивает возможность работы в одномодовом режиме во всех диапазонах длин волн начиная с O диапазона. Однако чем дальше от длины волны отсечки находится рабочая длина волны, тем больше потери, возникающие при изгибах волокон. В последние годы с развитием DWDM систем основным рабочим диапазоном стал C диапазон ($\lambda = 1550$ нм), так в него попадает полоса усиления эрбиевого волоконного усилителя (EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier). Для работы в этом диапазоне целесообразно использовать волокна с большей длиной волны отсечки (G. 654).

Недавно компания Sumitomo разработала волокна (Z Fiber, G. 654), обладающие предельно малыми потерями. В этих волокнах сердцевина не содержит примесей, а показатель преломления световедущей оболочки уменьшен путем легирования её примесью фтора (рис. 1.2).

Таким путем удалось не только снизить потери до рекордно малой величины 0.148 дБ/км на $\lambda = 1570$ нм, но и существенно повысить их радиационную стойкость. Профиль показателя преломления у Z Fiber ступенчатый, как и у SM волокон, и они обладают примерно такими же дисперсионными характеристиками. Применение волокон Z Fiber позволяет увеличить расстояние между ретрансляторами на 30 % по сравнению с SM волокнами. Они могут быть использованы также в качестве компенсаторов дисперсии для уменьшения влияния нелинейных эффектов в DWDM системах.

§ 3. Потери в изогнутых волокнах

Спектры потерь в изогнутых и в «прямых» волокнах могут существенно различаться. Так, например, в «прямых» волокнах потери на $\lambda = 1550$ нм меньше чем на $\lambda = 1310$ нм (рис. 1.3). В то же время потери, вносимые при изгибе волокна, на $\lambda = 1550$ нм больше чем на $\lambda = 1310$ нм (рис. 1.7).

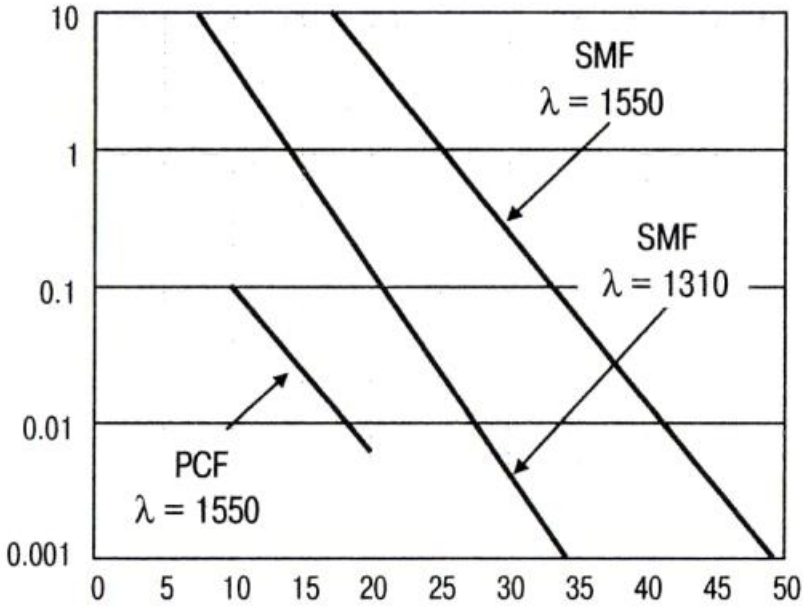


Рис. 1.7. Зависимость величины вносимых потерь от диаметра намотки для SMF и PCF волокон

В прямом волокне потери (в рабочих диапазонах волн) возникают в основном из-за релеевского рассеяния и уменьшаются с увеличением длины волны $\sim\frac{1}{\lambda^4}$. В изогнутом волокне возникают дополнительные потери из-за того, что периферийная часть моды распространяется со скоростью большей скорости света в оболочке. Потери, вносимые при изгибе волокна, тем меньше, чем больше скачок показателя преломления между сердцевиной и оболочкой, и чем ближе рабочая длина волны к длине волны отсечки. В SM волокне длина волны отсечки немного меньше 1310 нм и SM волокно поддерживает одномодовый режим не только на $\lambda = 1550$ нм, но и на $\lambda = 1310$ нм. Однако так как $\lambda = 1550$ нм находится дальше от длины волны отсечки, то потери, вносимые при изгибе волокна, как видно из рис. 1.7, на этой длине волны заметно больше, чем на $\lambda = 1310$ нм. Этот факт используется в рефлектометрии для поиска мест изгиба волокон.

В волокнах Z Fiber (G. 654) длина волны отсечки смещена в длинноволновую сторону (1460 нм в кабеле). Для них зависимость вносимых потерь от диаметра намотки на оправку на $\lambda = 1550$ нм должна быть примерно такой же, как в SM волокнах на $\lambda = 1310$ нм. Однако, в отличие от SM волокон, волокна Z Fiber не поддерживают одномодовый режим на $\lambda = 1310$ нм.

В правильно сконструированном кабеле диаметр изгиба SM волокон обычно заметно больше 40 мм и потери, вносимые за счет изгиба волокон, пренебрежимо малы. Однако при укладке оптических шнуров (их обычно изготавливают из SM волокон) в распределительные шкафы для уменьшения габаритов этих шкафов желательно иметь возможность изгибать волокна значительно сильнее. В то же время, как видно из рис 1.7, при диаметре изгиба порядка 20 мм вносимые потери в SM волокнах достигают нескольких децибел.

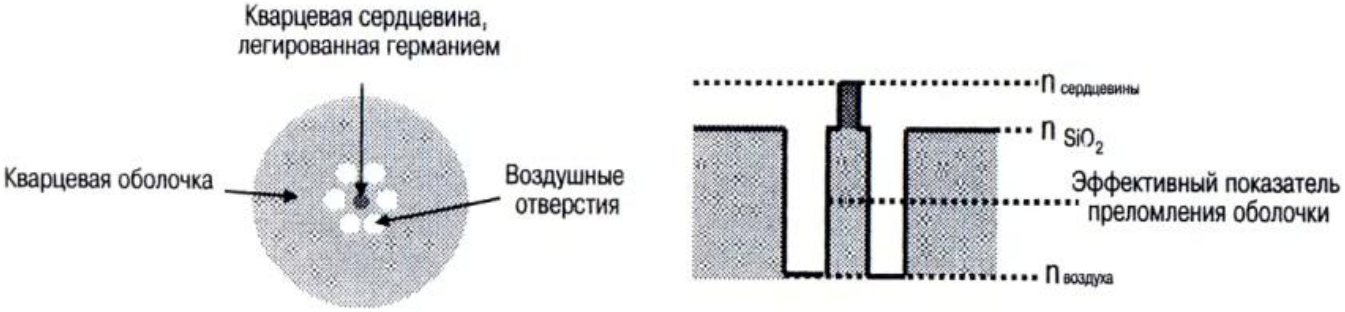


Рис. 1.8. Профиль показатель преломления дырчатого волокна (Holey Fiber)

Компания Hitachi разработала дырчатое волокно (PCF – Photonic Crystal Fiber), предназначенное специально для изготовления оптических шнуров (рис. 1.8). Оно

практически не чувствительно к изгибу (таблица № 1.3) и обладает малыми потерями при соединении с SM волокнами (~ 0.12 дБ). Потери и дисперсия в этом волокне заметно больше, чем в SM волокнах, но для относительно коротких длин волокна в оптических шнурах это несущественно. Волокно поддерживает одномодовый режим на длинах волн 1550 нм и 1310 нм.

Таблица № 1.3. Типичные характеристики PCF волокон на λ = 1550 нм

Параметр	4-отверстия	6-отверстий
Диаметр отверстий	10	
Потери, дБ/км	0,35	0,44
Дисперсия, пс/(нм×км)	25,0	26,3
Диаметр модового пятна, мкм	8,7	8,2
Потери при изгибе волокна, дБ/виток*	0,1	< 0,001
Длина волны отсечки, нм	< 1300	
Потери при сварке с SM волокнами, дБ	0,12 (средние)	

*Диаметр оправки 10 мм

Малые вносимые потери при изгибе PCF волокон достигаются за счет того, что отверстия окружающие сердцевину волокна, легированную германием, понижают эффективный показатель преломления световедущей оболочки. При этом удается получить достаточно большой диаметр модового пятна, что необходимо для эффективного согласования с SM волокнами и обеспечения малой чувствительности к изгибу волокна.

§ 4. Потери в месте соединения волокон

Распределение интенсивности первой моды в поперечном сечении волокна хорошо описывается функцией Гаусса: $I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{8r^2}{w^2}\right)$, где w – диаметр модового пятна. Поэтому расчет потерь в месте соединения волокон сводится к хорошо известной задаче об эффективности согласования двух гауссовых пучков. Основной вклад в потери дает смещение сердцевин волокон друг относительно друга (d) и неравенство диаметров модовых пятен (Δw)

$$\alpha(\partial Б) \cong 4,34\left(\left(\frac{2d}{w}\right)^2 + \left(\frac{\Delta w}{w}\right)^2\right) \qquad (1.1)$$

В принципе, существуют еще потери, возникающие из-за отражения света от торца волокна, из-за эллиптичности модовых пятен и не параллельности осей соединяемых волокон. Потери, обусловленные френелевским отражением пренебрежимо малы, так как волокна стремятся соединять так, чтобы между ними возник оптический контакт. Например, френелевские потери в оптическом разъеме с коэффициентом отражения R = 10^{-4} (–40 дБ) равны:

$$\alpha_\phi(\partial Б) = -10\log T = -10\log(1-R) \cong -4,34\ln(1-R) \cong (4,34R) \cong 0,0004\,\partial Б.$$

Потери, вызванные эллиптичностью модовых пятен также малы, так как современные волокна обладают малой эллиптичностью (см. таблицу № 1.4). Для волокон с эллиптичностью 1% доля неперекрывшейся площади модовых пятен соединяемых волокон, будет порядка 10^{-4}, а потери, соответственно, меньше 0.001 дБ. Потери, обусловленные непараллельностью осей соединяемых волокон, прямо пропорциональны квадрату угла θ между осями волокон $\alpha_\theta(\partial Б) \cong 4,34\left(\frac{\pi n w \theta}{2\lambda}\right)^2$, где n = 1.46 – показатель преломления кварцевого стекла. Обычно волокна соединяют так, что угол между их осями θ меньше десятых градуса. Учитывая, что w = 7λ, потери α_θ (дБ) получаются меньше 0.01 дБ.

Таблица № 1.4. Геометрические параметры SM волокон (G. 652)

Параметры	Alcatel	Corning	Hitachi	OFS	YOFC
Диаметр модового пятна, мкм на λ = 1310 нм и на λ = 1310 нм	9.0 ± 0.5 10.2 ±0.5	9.2 ± 0.4 10.4 ±0.8	9.2 ± 0.4 10.5 ± 1	9.2 ± 0.4 10.5 ±1	9.3 ± 0.4
Диаметр оболочки, мкм	125 ± 1	125 ±0.7	–	125 ±0.7	125 ±1
Эллиптичность оболочки	≤ 1%	≤ 1%	–	≤ 1%	≤ 1%
Эксцентриситет сердцевины/оболочки, мкм	≤0.6	≤0.5	–	≤0.5	≤0.6
Радиус собственного изгиба волокна, м	>4	>4	>4	–	>4

Потери в месте соединения волокон, вызванные смещением их сердцевин, в принципе, могут быть практически полностью устранены. Так происходит, например, при сварке высококачественных SM волокон с помощью высокоточных сварочных аппаратов, где осуществляется коррекция эксцентриситета сердцевин волокон. При идеальной юстировке волокон и отсутствии дефектов величина потерь в месте соединения волокон, как видно из (1.1), определяется разностью диаметров модовых пятен.

Допуск на диаметр модового пятна $\Delta w_д$ составляет, как видно из таблицы № 1.4, достаточно большую величину (10...20 %). Например, для волокон компании Hitachi на λ = 1310 нм он составляет 0.4 мкм.

Соответственно разность диаметров соединяемых волокон может достигать величины 0.8 мкм. При этом диаметр модового пятна (он прямо пропорционален длине волны ($w \approx 7\lambda$)) равен примерно 10 мкм. Полагая $w \approx 10$ мкм и $\Delta w = 2\Delta w_д = 0.8$ мкм и $d = 0$ с помощью (1.1) получаем оценку: $\alpha_{\Delta w}(дБ) \cong 4,34\left(\frac{\Delta w}{w}\right)^2 \cong 0,03\,дБ$, что больше среднего значения потерь в сростках SM волокон (~ 0.02 дБ).

Появление такой завышенной оценки объясняется тем, что крайне мала вероятность того, что разность диаметров свариваемых волокон достигнет величины $\Delta w = 2\Delta w_д = 0.8$ мкм. Дело в том, что в качестве допуска $\Delta w_д$ принято указывать не величину среднеквадратичного отклонения диаметра модового пятна σ, а в три раза большую величину: $\Delta w_д = 3\sigma$. Вероятность же появления волокон с диаметрами модовых пятен, отличающихся от среднего значения на величину больше 3σ, крайне мала – порядка 1/400 (для нормального распределения). В качестве примера на рис. 1.12 приведена гистограмма распределения диаметра модового пятна для SM волокон компании Hitachi. Как видно из рис. 1.9, среднеквадратичное отклонение диаметра модовых пятен σ = 0.12 мкм. При этом величина 3σ = 0.46 мкм близка к величине допуска $\Delta w_д$ = 0.4 мкм приведенного в таблице № 1.4.

Рис. 1.9. Гистограмма распределения диаметров модовых пятен в SM волокнах компании Hitachi на λ = 1310 нм

Оценим величину средних потерь в месте соединения волокон в предположении, что диаметры модовых пятен распределены по нормальному закону с дисперсией равной σ^2. Тогда разность диаметров модовых пятен Δw также будет распределена по нормальному закону, но для неё дисперсия будет в два раза больше: $\langle \Delta w^2 \rangle = 2\sigma^2$ (угловые скобки означают операцию усреднения). С помощью (1.1) находим

$$\left\langle \alpha_{\Delta w}(\partial Б) \right\rangle \cong 4,34 \cdot 2 \frac{\left\langle \Delta w^2 \right\rangle}{w^2} \cong 8,78 \frac{\sigma^2}{w^2}. \qquad (1.2)$$

Запишем выражение для средних потерь через допуск на диаметр модового пятна $\Delta w_д$ так как в спецификациях обычно приводится именно эта величина, а не величина стандартного отклонения σ. Учитывая, что $\Delta w_д = 3\sigma$, с помощью (1.2) получаем

$$\left\langle \alpha_{\Delta w}(\partial Б) \right\rangle \cong \frac{\Delta w_д^2}{w^2} \qquad (1.3)$$

При w ≈ 10 мкм и $\Delta w_д$ = 0.4 мкм получаем оценку: $\left\langle \alpha_{\Delta w}(\partial Б) \right\rangle \cong 0,0016$ дБ. Следовательно, при соединении высококачественных волокон одного производителя потерями из-за разности диаметров модовых пятен можно пренебречь и основной вклад в потери возникает из-за смещения сердцевин волокон.

Потери из-за смещения сердцевин волокон являются преобладающими в тех случаях, когда юстировка волокон осуществляется по оси кварцевой оболочки, например, в оптических разъемах, в механических соединителях, а также при массовой сварке волокон (без юстировки волокон по сердцевине). При этом на величину смещения сердцевин волокон влияет несколько факторов: эксцентриситет сердцевины/оболочки, величина допуска на диаметр кварцевой оболочки волокна, её эллиптичность и радиус собственного изгиба волокна.

Средняя величина потерь для механических соединителей – порядка 0.05 дБ, а для оптических разъемов – порядка 0.1…0.5 дБ. Дополнительные потери в оптических разъемах возникают из-за смещения кварцевой оболочки волокна относительно оси наконечников в разъемах и смещения осей наконечников в соединительной втулке. Потери из-за непараллельности осей соединяемых волокон, как правило, малы, так как волокна обладают большим радиусом собственного изгиба и юстируются в прецизионных V-образных канавках и капиллярах. Средние потери в сростках высококачественных SM волокон малы (~ 0.02 дБ) и обусловлены совокупным действием всех факторов, влияющих на величину потерь в месте соединения волокон.

§ 5. Измерение потерь с помощью оптических тестеров

Существуют два метода измерения потерь в оптических волокнах, которые, в соответствии с G. 651 и G. 652, принято считать эталонными – метод облома волокна и метод вносимых потерь. В них измерения потерь осуществляются с помощью оптических тестеров. В методе облома волокна измеряется мощность P1 (в дБм), прошедшая через все волокно. Затем волокно обламывается на расстоянии около двух метров от места ввода излучения (рис. 1.10) и измеряется мощность P2 (в дБм), прошедшая через оставшийся короткий участок волокна. Величина потерь в волокне определяется как разность A(дБ) = P1(дБм) – P2(дБм).

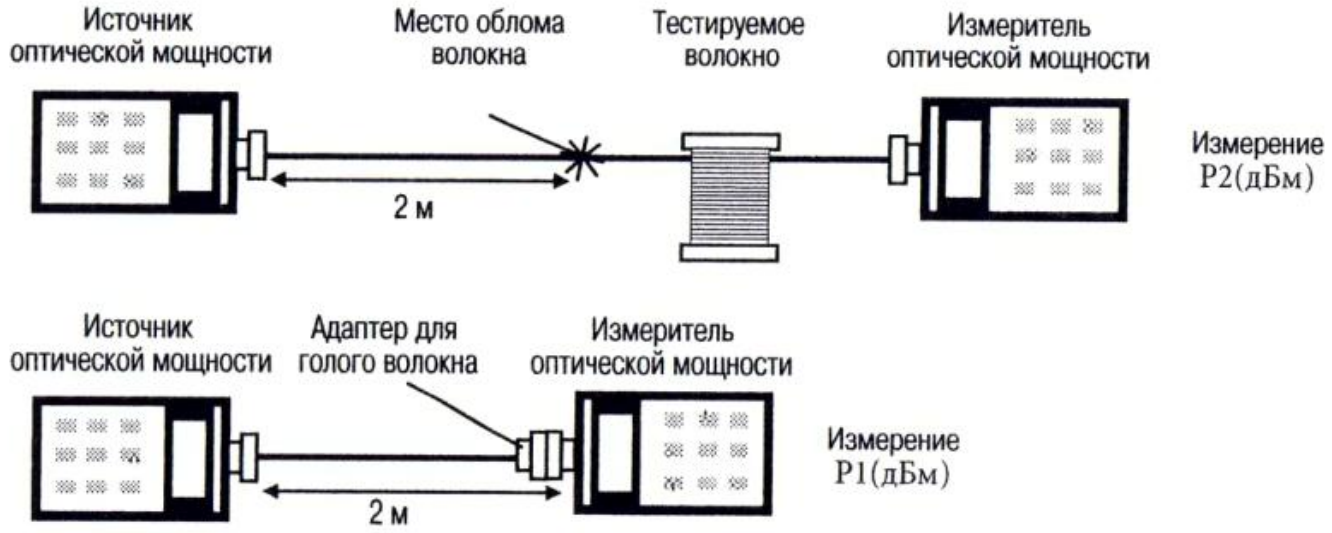


Рис. 1.10. Схема измерения потерь в волокне методом облома волокна

Метод облома волокна обеспечивает наивысшую точность, так как в нем доля мощности, введенная в волокно, остается неизменной. Его недостаток в том, что нарушается целостность волокна и его нельзя использовать в процессе монтажа линии передачи. Поэтому более распространенным является метод вносимых потерь (рис. 1.11). В этом методе вначале измеряется величина опорной мощности P1 (в дБм). Затем между измерителем оптической мощности и источником оптического излучения вставляется тестируемое волокно или линия передачи и измеряется величина прошедшей мощности P2 (в дБм). Величина потерь определяется как разность A(дБ) = P1(дБм) – P2(дБм).

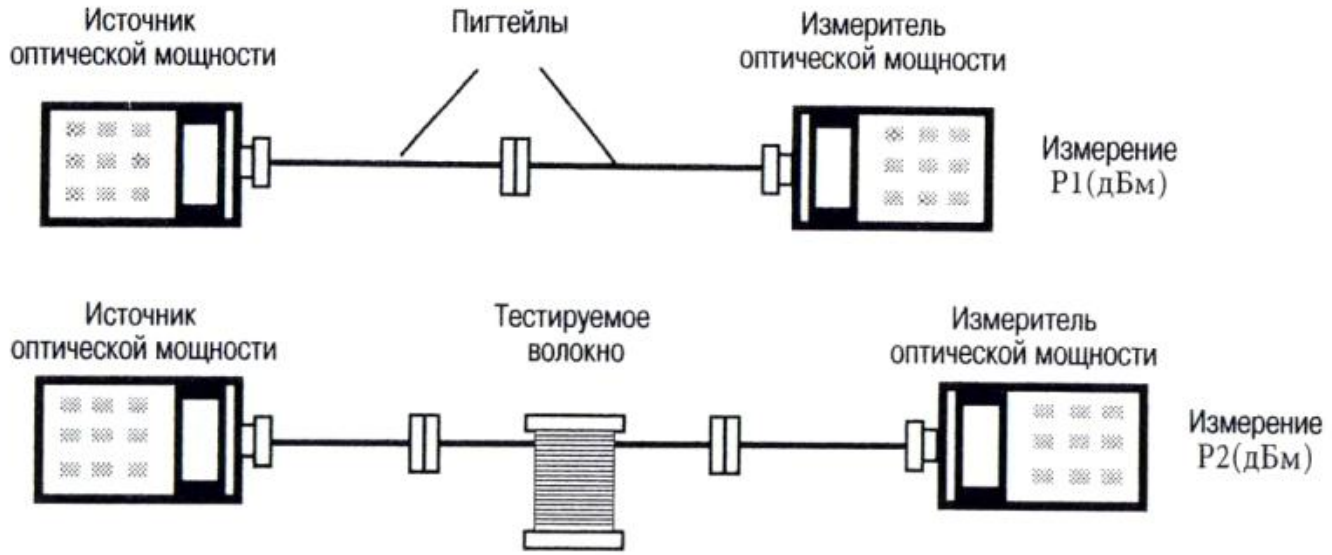


Рис. 1.11. Схема измерения потерь вносимых оптическим волокном

Метод вносимых потерь используется при измерении полных потерь в линии передачи. Из-за того, что концы линии разнесены обычно на большое расстояние, при таких

измерениях надо проводить дополнительную калибровку лазерного и фотоприемного модуля (рис. 1.12). Фотоприемный блок оптического тестера, в пункте А, используется для измерения опорного значения мощности излучения лазерного блока, а фотоприемный модуль оптического тестера, в пункте Б – для измерения мощности излучения, прошедшей через линию связи.

Вначале оператор, находящийся в пункте А, соединив вход и выход оптического тестера оптическим шнуром, измеряет величину опорного сигнала. Затем он отсоединяет разъём шнура от розетки фотоприемного блока и подсоединяет его к разъёму на входе в линию. Оператор, находящийся в пункте Б, подключает с помощью оптического шнура свой оптический тестер к выходу линии и измеряет величину сигнала. Затем с помощью оптического телефона (или каким-либо другим способом) он сообщает результат измерений оператору, находящемуся в пункте А. Величина потерь (с учетом разности показаний фотоприемных блоков полученных в процессе их сверки) рассчитывается по формуле: А(дБ) = опорный сигнал в дБм – сигнал в дБм.

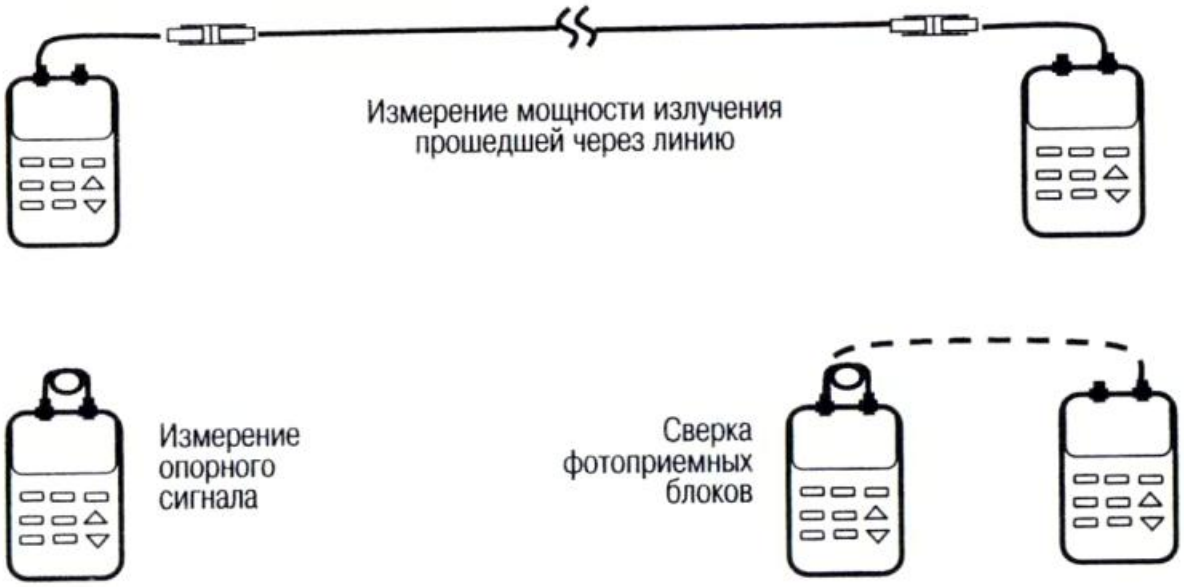


Рис. 1.12. Измерение потерь в ВОЛС с помощью оптических тестеров.

При такой схеме измерений погрешность возникает по следующим причинам:

- нестабильность источника излучения
- нелинейность шкалы мультиметра
- разная чувствительность фотоприемных блоков на разных концах линии
- отклонения величины потерь в разъёмах от их номинального значения

Кратковременная нестабильность лазерного блока (например, по паспортным данным AQ 2150) равна 0.02 дБ, реально же она не превышает цену деления его шкалы (0.01 дБ). Стабильность светодиодного блока выше, чем у лазерного, однако при его использовании величина потерь в волокне оказывается завышенной примерно на 5 % из-за относительно широкой полосы излучения светодиода (50...100нм).

Нелинейность оптического тестера в диапазоне от 0 до 30 дБ также не превышает его цены деления. Погрешность, возникающая из-за разной чувствительности фотоприемных блоков, устраняется путем сверки их показаний до начала измерений потерь в линии и после их окончания. Наибольшая же погрешность возникает из-за того, что не известна точно величина потерь в разъемах.

Как известно, при соединении разъёмов «любого с любым» величина потерь в месте соединения разъёмов может отличаться от их номинального значения на величину порядка среднего значения этих потерь (~ 0.2 дБ). Эта неопределенность величины потерь в разъёмах и даст основной вклад в результирующую погрешность, возникающую при измерении полных потерь в линии.

Хотя потери в одномодовом волокне не зависят от направления распространения света, принято проводить измерения потерь в линии в обоих направлениях. Таким образом, удается исключить некоторые систематические погрешности. Например, если по ошибке к одномодовому волокну (в оптическом кабеле) был приварен пигтейл из многомодового волокна. Тогда потери в линии будут зависеть от направления распространения света (т.е. различаться больше чем погрешность измерений), так как коэффициент передачи со стороны одномодового волокна больше, чем со стороны многомодового волокна. Или, например, усреднив результаты измерений потерь во встречных направлениях, можно исключить систематическую ошибку, возникающую из-за разной чувствительности фотоприемных блоков мультиметров, размещенных на разных концах линии.

Раздел II

ОПТИЧЕСКИЕ ИМПУЛЬСНЫЕ РЕФЛЕКТОМЕТРЫ (OTDR)

§ 6. Принцип действия OTDR

Принцип действия OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) во многом такой же, как и у импульсных рефлектометров, применяемых для тестирования электрических кабелей. Оба типа рефлектометров посылают в линию мощный зондирующий импульс (оптический или электрический) и измеряют мощность и время запаздывания импульсов, вернувшихся обратно в рефлектометр. Отличие заключается в том, что в электрической линии наблюдаются только отраженные импульсы. Они образуются в местах, где в линии имеются скачки волнового сопротивления. В оптических же волокнах обратная волна образуется не только за счет отражения от больших (по сравнению с длиной волны) дефектов, но и за счет релеевского рассеяния. Рассеяние света происходит на флуктуациях показателя преломления кварцевого стекла, застывших при вытяжке волокна. Размер этих неоднородностей (релеевских центров) мал по сравнению с длиной волны и свет на них рассеивается во все стороны, в том числе и назад в моду волокна (рис. 1.13).

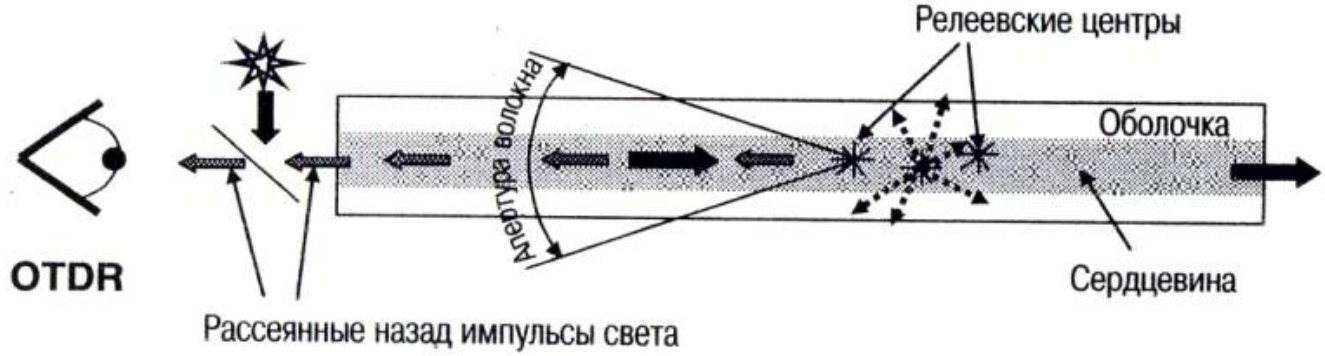


Рис. 1.13. В OTDR приходят импульсы света рассеянные назад в моду волокна

Релеевские центры распределены однородно вдоль волокна, и в рассеянной на них волне содержится информация обо всех параметрах линии, влияющих на поглощение света. Именно за счет детектирования рассеянного излучения удается обнаруживать неотражающие (поглощающие) неоднородности в волокне. Например, по сигналу обратного релеевского рассеяния света можно измерить распределение потерь в строительных длинах оптических кабелей и потери в сростках волокон. Такие измерения нельзя выполнить, регистрируя только отраженное (а не рассеянное) излучение.

Доля мощности света, рассеиваемая назад в моду волокна крайне мала. Например, при ширине импульса 1м (длительность импульса 10 нс) коэффициент обратного релеевского рассеяния составляет величину около –70 дБ. Поэтому, в OTDR в волокно посылаются импульсы большой мощности и большой длительности, а для детектирования рассеянных назад импульсов света применяются высокочувствительные фотоприемники.

В большинстве моделей OTDR используется модульная конструкция (рис. 1.14). Она содержит базовый модуль и несколько сменных оптических модулей. Базовый модуль представляет собой персональный компьютер, приспособленный для обработки сигнала и вывода его на дисплей. Оптический модуль включает в себя лазерный диод, фотоприемник, оптический ответвитель и оптический разъем. Стоимость оптического модуля зависит от величины его динамического диапазона и может в несколько раз превышать стоимость базового модуля. Модульная конструкция OTDR позволяет потребителю не только выбрать необходимую ему на данный момент конфигурацию прибора, но и в дальнейшем модернизировать прибор, например, установив, многомодовый модуль или одномодовый модуль с большим динамическим диапазоном.

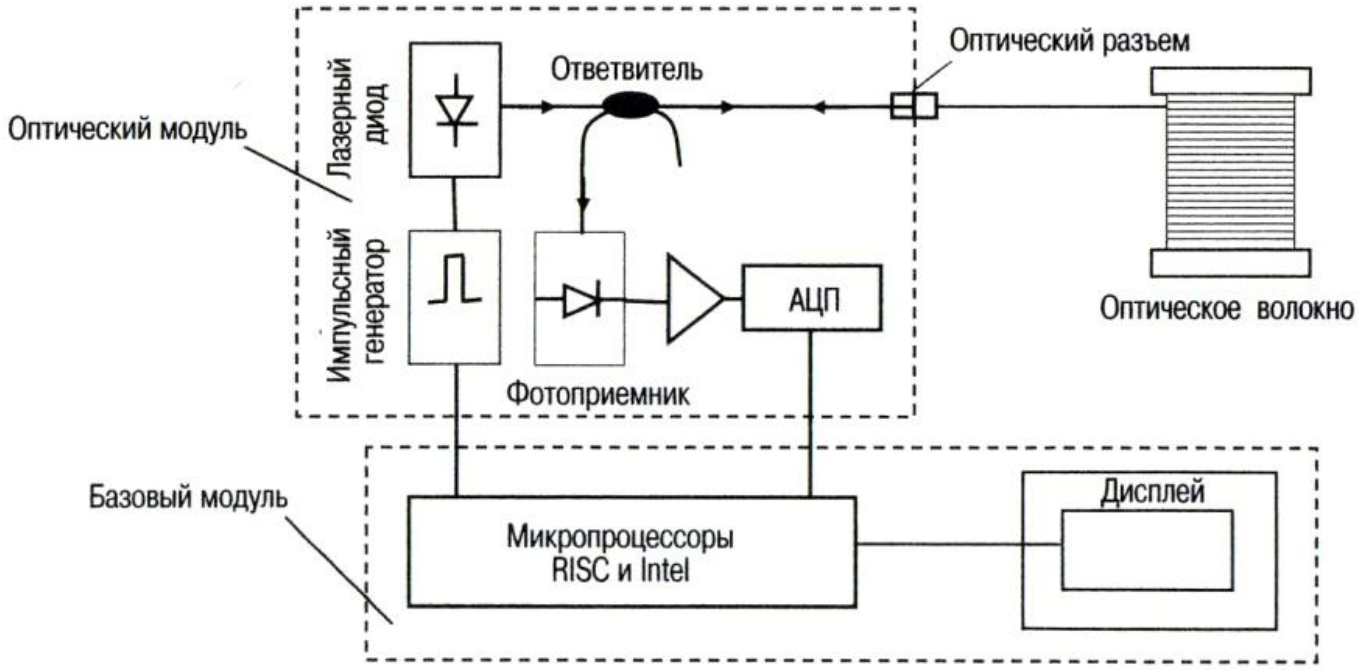


Рис. 1.14. Блок схема OTDR

В качестве источника излучения в оптическом модуле обычно используется лазерные диоды типа Фабри-Перо, наибольшая же мощность излучения (и, соответственно, динамический диапазон рефлектометра) достигается с помощью лазерных диодов с квантовыми ямами. С их помощью генерируются импульсы мощностью 10...1000 мВт, длительностью от 2 нс…20 мкс и частотой повторения несколько килогерц. Эти импульсы поступают через ответвитель на оптический разъем, к которому подключается исследуемое волокно. Рассеянные в волокне импульсы света возвращаются в оптический модуль и передаются с помощью ответвителя на фотоприемник (лавинный фотодиод), где они преобразуются в электрический сигнал. Этот сигнал усиливается, накапливается, обрабатывается в базовом модуле и отображается на дисплее в графической форме в виде рефлектограммы. Такое представление информации позволяет анализировать её как визуально, так и автоматически с помощью встроенных программных алгоритмов.

Мощность рассеянных назад импульсов на 80…50 дБ (в зависимости от их длительности) меньше мощности импульсов, вводимых в волокно. Поэтому для улучшения отношения сигнал/шум используется многократное усреднение результатов измерений. Причем для их эффективного усреднения достаточно нескольких секунд, так как время, затрачиваемое на прохождении линии мало (100 км свет проходит за 1 мсек). Типичная рефлектограмма содержит около 32 000 измеряемых точек и при вычислении каждой такой точки усредняется несколько тысяч импульсов. Весь этот массив данных рефлектометр обрабатывает за долю секунды. Первая измеренная рефлектограмма сразу выводится на дисплей. Далее на дисплей выводятся усредненные рефлектограммы. При каждом удвоении времени измерений шумы в усредненной рефлектограмме уменьшаются примерно на 0.75 дБ.

Обработка большого массива данных и создание дружественного пользователю интерфейса осуществляется с помощью двух микропроцессоров. Первый, быстродействующий процессор RISC, дает возможность усреднять до 50 миллионов точек в секунду. Второй процессор Intel обеспечивает работу интерфейсной части программы, автопоиск дефектов в линии, вывод данных на дисплей. Он обеспечивает также совместимость с ПК, что позволяет применять не только обычное программное обеспечение, но и стандартное компьютерное оборудование, такое как клавиатура, мышь, принтер, факс/модем и жесткий диск (в стандарте PCMCIA). Такой рефлектометр может использоваться и как измерительный прибор, и как персональный компьютер, представляющей широкие возможности для обработки информации. Например, для того, чтобы восстановить в увеличенном виде любую из частей рефлектограммы, создать полный список неоднородностей в линии и погонного затухания на участках между неоднородностями, оформить отчет и т.д.

§ 7. Назначение OTDR

Каждый тип неоднородности (сварное соединение волокон, трещина, оптический разъем и т.д.) имеет свой характерный образ на дисплее OTDR, и может быть легко идентифицирован оператором (рис. 1.15). В автоматическом режиме OTDR сам определяет тип неоднородности, рассчитывает потери на участках линии, коэффициенты отражения от неоднородностей и т.д.

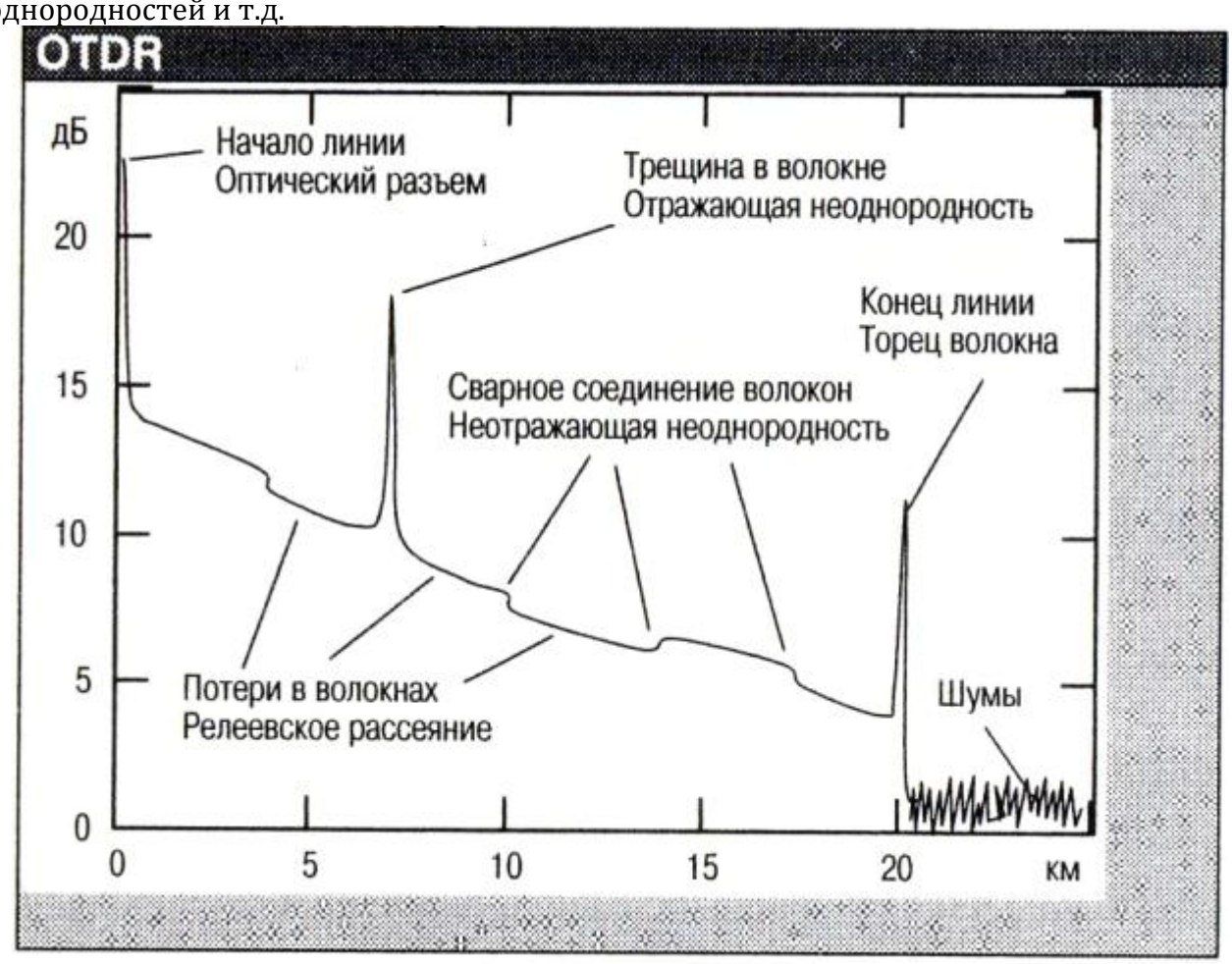


Рис. 1.15. Типичная рефлектограмма линии передачи.
По вертикальной оси в логарифмическом масштабе откладывается относительная мощность вернувшихся в рефлектометр импульсов, а по горизонтальной оси расстояние до места отражения

Так, например, отражающие неоднородности (разъемные соединения волокон, трещины, торец волокна) проявляются на рефлектограмме в виде узких пиков, а неотражающие неоднородности (сварные соединения и изогнутые участки волокон) - в виде изгибов в рефлектограмме. Участки рефлектограммы, расположенные между неоднородностями, имеют вид прямых линий с отрицательным наклоном. Угол наклона

этих прямых прямо пропорционален величине потерь в волокне. Основные параметры линии передачи, измеряемые с помощью оптического рефлектометра, приведены в таблице № 1.5.

Таблица № 1.5. Параметры линии передачи, измеряемые с помощью OTDR

Наименование объекта	Измеряемый параметр
Каждая неоднородность в линии передачи	местоположение потери коэффициент отражения
Каждый оптический кабель	строительная длина, полные потери в дБ, погонные потери в дБ/км, полные обратные потери (ORL)
Полностью смонтированная линия передачи	длина линии полные потери в дБ полные обратные потери (ORL)

Важным достоинством рефлектометрических измерений является то, что в них измерительный прибор подключается только к одному концу линии (рис. 1.16). Так как типичная длина регенерационного участка в магистральной линии передачи составляет около 100 км (с оптическими усилителями ~ 1000 км), то ясно, что подключать измерительную аппаратуру только к одному концу такой линии значительно проще.

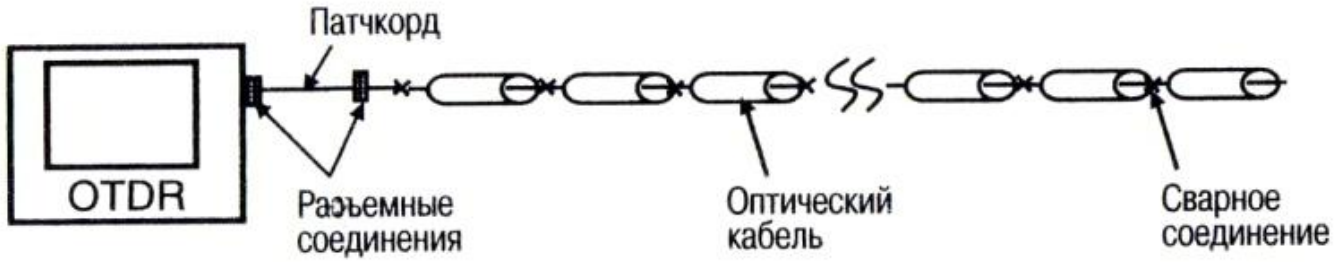


Рис. 1.16. Рефлектометр подключается только к одному из концов линии

После того, как линия смонтирована, измеряются потери во всех соединениях волокон и расстояния до них. При этом фиксируется рефлектограмма всего регенерационного участка линии со всеми её особенностями, указывающими местоположение сварных соединений волокон и величину потерь в них. Эта рефлектограмма используется для географической привязки к местности и в дальнейшем служит для контроля деградации линии в процессе её старения.

На рис 1.17 в качестве примера приведены рефлектограммы (новая и старая) одного и того же регенерационного участка линии длиной около 30 км, измеренные при сдаче и после одного года эксплуатации линии. Видно, что по прошествии года потери в сварном соединении волокон, расположенном на расстоянии около 17 км от начала линии, увеличились на несколько дБ. Это значит, что линия уже практически вышла из строя, и для того, чтобы восстановить линию, это сварное соединение волокон необходимо переделать.

Рис. 1.17. Контроль изменения полных потерь в линии передачи в процессе её старения

Разрушение волокон в оптических кабелях происходит в основном из-за натяжения волокон и проникновения в кабель воды. Избыточные натяжения волокон могут возникнуть как из-за нарушений технологии изготовления кабеля на заводе, так и при деформации кабелей подвешенных на линиях электропередачи или уложенных грунт подверженный мерзлотным деформациям, землетрясениям и т.д. Однако с помощью OTDR нельзя измерить натяжение волокон в оптических кабелях. Для этого необходим значительно более дорогой и сложный бриллюэновский рефлектометр (BOTDR).

Многие оптические кабели в линиях передачи содержат запасные (темные) волокна. Потери в темных волокнах можно контролировать с помощью рефлектометра обычным способом, подключившись к одному концу темного волокна, в то время как передача трафика осуществляется по соседним (активным) волокнам. При этом измерения можно проводить на тех же длинах волн, на которых обычно ведется передача трафика. Эффективность такого способа обусловлена тем, что, как показывает практика, примерно в 80% случаев повреждение кабеля нарушает работу одновременно всех волокон. Для повышения надежности линии передачи необходимо проводить тестирование активных волокон. Тестирование активных волокон обычно проводится на более длинных волнах, так как в изогнутом волокне потери быстро возрастают при увеличении длины волны. Так, если передача ведется на длине волны 1310 нм, то для тестирования используется длина волны 1550 нм, а если передача ведется на длине волны 1550 нм, то тестирование линии осуществляется на длинах волн 1610...1650 нм (рис. 1.18).

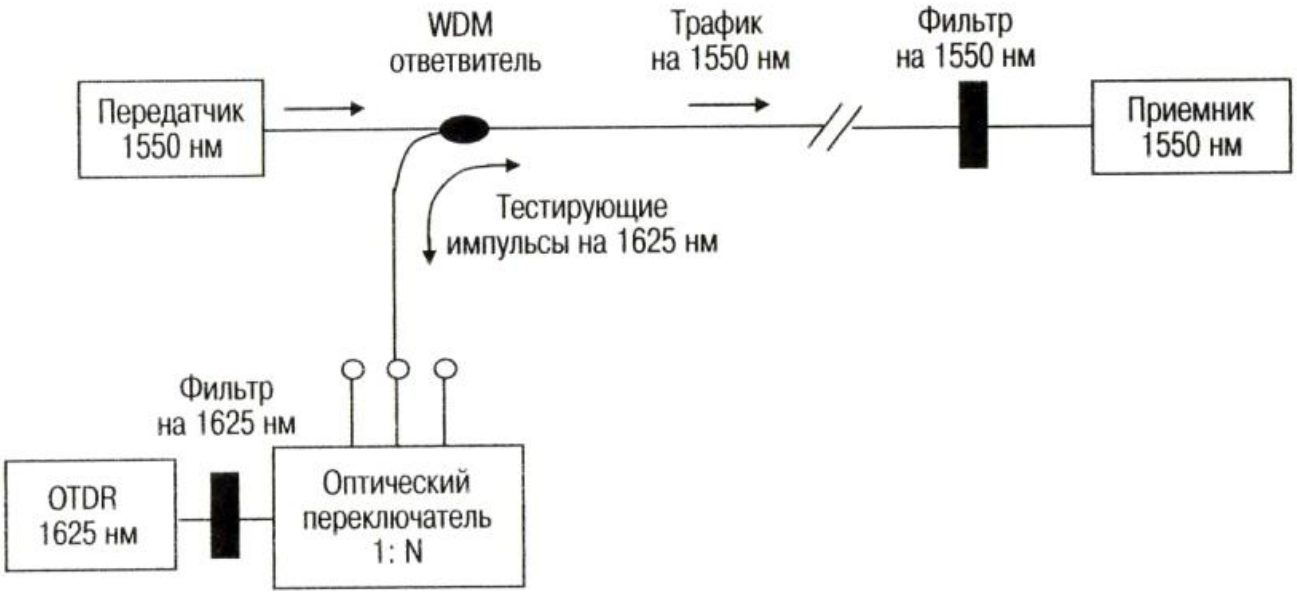


Рис. 1.18. Схема тестирования активного волокна с помощью рефлектометра работающего на длине волны 1625 нм

С помощью WDM ответвителя рефлектометр может быть подключен к линии передачи практически без потерь на рабочей длине волны линии. Такой ответвитель пропускает излучение с длиной волны, на которой ведется передача трафика и ответвляет излучение с длиной волны, на которой проводится тестирование линии. Перед приемником в линии передачи устанавливается оптический фильтр, не пропускающий излучение на той длине волны, на которой работает рефлектометр, а перед рефлектометром фильтр, не пропускающий излучение, на той длине волны, на которой ведется передача трафика. Это делается для того, чтобы избежать перекрестных помех, возникающих при попадании в фотоприемник излучения с другой длиной волны. Рефлектометр подсоединяется к линии с помощью оптического переключателя (1 : N), обеспечивающего автоматическое подключение рефлектометра к N волокнам кабеля (поочередно).

§ 8. Типы OTDR

Мини-рефлектометры (mini-OTDR) (рис. 1.19) – применяются в полевых условиях для проведения всех необходимых видов измерений: определения местоположения обрывов волокна, участков линии с большими значениями потерь, коэффициентов отражения и т.д. Новые модели mini-OTDR могут комплектоваться оптическими модулями с большим динамическим диапазоном (до 50 дБ) и находят все большее применение не только в полевых, но и в лабораторных условиях, где до этого в основном применялись стационарные OTDR. Приборный ряд этого направления представлен на российском рынке такими крупными компаниями как: Agilent Technologies, Ando, Anritsu, EXFO, Wavetek, GN-NETEST.

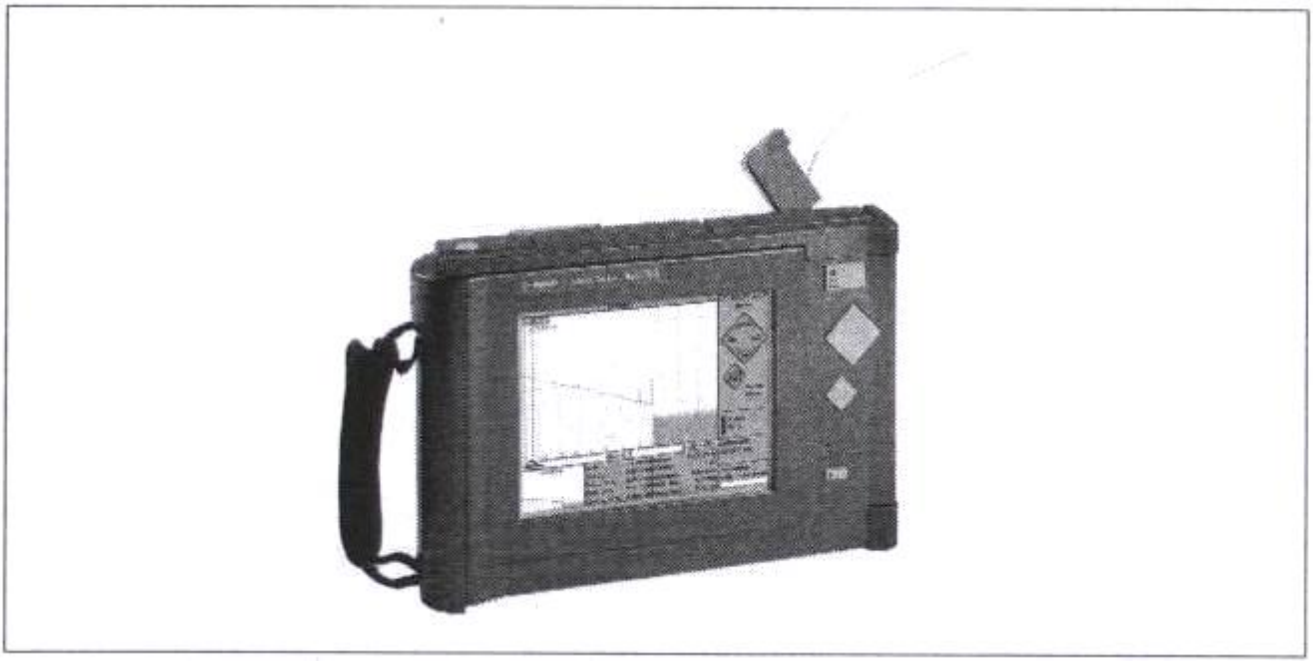


Рис. 1.19. Мини-рефлектометр E6000C компании Agilent Technologies (со сменными оптическими модулями). Габариты базового модуля рефлектометра примерно равны пачке бумаги формата А4

Стационарные рефлектометры применяются, в основном, в лабораториях. Они имеют большой вес и габариты, и более широкие функциональные возможности по сравнению с mini-OTDR. Например, функцию маски для устранения всплеска сигнала в начале рефлектограммы, возникающего при отражении сигнала от разъема рефлектометра.

Идентификаторы дефектов (Fault locators) – сравнительно недорогие приборы, предназначенные для определения места повреждения волокна. Классическим способом обнаружения трещин в волокне является засветка его красным лазером. Обычно используют лазеры, работающие на λ = 635 нм, где находится максимум чувствительности глаза, или на λ = 670 нм, где потери в волокне меньше. Однако так можно обнаружить трещину в волокне, только в тех местах, где кабель разделан, например, когда волокна уложены в кассету. Кроме того, из-за больших потерь в волокне на этих длинах волн трещину можно обнаружить только на относительно небольшом расстоянии от места ввода лазерного излучения (до 5 км).

Для поиска места повреждения волокна часто используют устройства для ввода и вывода излучения путем изгиба волокна (clip on identifiers). С их помощью можно определить, засвечено ли активное волокно в этом месте или нет, и, таким образом, определить примерно длину участка линии, до которого ещё проходит сигнал.

Упрощенные модели OTDR (часто снабженные только цифровой индикацией) позволяют обнаруживать повреждения волокон внутри кабеля, т.е. при этом не требуется иметь доступ непосредственно к волокну, как в предыдущих случаях. Однако они обладают обычно небольшим разрешением, что ограничивает эффективность их применения, так как все равно приходится повторять измерения с помощью mini-OTDR для уточнения положения места повреждения волокна и для контроля качества проведения ремонтных работ.

Блоки дистанционного контроля (RTU – remote test unit). Применяются в системах дистанционного мониторинга оптических сетей. При этом компьютер, расположенный на центральной станции, сохраняет все рефлектограммы, что позволяет в дальнейшем контролировать изменения в различных участках сети. Их применение особенно важно в линиях передачи с большим трафиком, где экономические потери в случае повреждения линии могут быть весьма значительными.

Портативные измерительные системы (Agilent N3900A, EXFO FTB-400) предназначены для тестирования оптических сетей при их строительстве и эксплуатации. В них содержится линейка приборов высочайшего класса, обладающих прекрасными эксплуатационными характеристиками. Система может комплектоваться модулями

оптического рефлектометра, оптического переключателя, оптического анализатора спектра, измерителя хроматической дисперсии и PMD (поляризационной модовой дисперсии). К базовому модулю может быть подключен также и микроскоп с видеокамерой для контроля качества торцов оптических разъемов. Модульная конструкция системы позволяет компоновать из нее именно те приборы, которые необходимы в данный момент оператору.

Кроме рассмотренных выше типов OTDR в линиях передачи и в различных областях промышленности применяется также много других типов рефлектометров:

Бриллюэновский рефлектометр (BOTDR) применяется для измерения натяжений в оптических волокнах - основного параметра определяющего срок службы оптических кабелей. Натяжения волокна находится по величине смещения частоты обратной волны в волокне, вызванной эффектом бриллюэновского рассеяния. Бриллюэновский рефлектометр отличается от традиционной схемы OTDR тем, что в нем используется когерентный прием излучения и анализатор спектра. В настоящее время в Японии принята практика 100 % контроля натяжений в магистральных оптических кабелях после землетрясений.

Рефлектометр с высоким пространственным разрешением, выпускаемый компанией Opto Electronics Inc. Он применяется для контроля отражений в оптических элементах. От традиционной схемы OTDR, применяемой для контроля качества линий связи, отличается значительно более высоким пространственным разрешением (~ 1 мм, длительность импульсов ~ 1 псек) и меньшей чувствительностью (не регистрирует сигнал обратного релеевского рассеяния).

Поляризационный рефлектометр (POTDR). Применяется для измерения распределения двулучепреломления (длины биений) вдоль волокна. От традиционной схемы OTDR отличается тем, что на выходе лазера установлен поляризатор, а на входе в фотоприемник установлен анализатор состояния поляризации отраженного от волокна излучения.

Известно также много других схем оптических рефлектометров (~ 10) по разным причинам (в первую очередь из-за сложности) применяемых в основном в лабораториях:

- когерентные OTDR (CO-OTDR)
- корреляционные OTDR (COR-OTDR)
- OTDR с малой длиной когерентности (LC-OTDR)
- OTDR с фотоприемником работающем в режиме счета фотонов (PC-OTDR)
- бриллюэновский анализатор (BOTDA)
- различные типы частотных рефлектометров (OFDR)

2

ХАРАКТЕРИСТИКИ OTDR

Оптический импульсный рефлектометр (OTDR – Optical Time Domain Reflectometer) впервые был применен для измерений потерь в оптических волокнах в 1976 г. Его принцип действия основан на том, что в волокно посылается последовательность коротких импульсов света, и измеряется зависимость мощности рассеянных назад импульсов от времени их запаздывания. В результате получается рефлектограмма – график распределения потерь и коэффициентов отражения вдоль линии. Для подключения OTDR достаточно доступа только к одному концу линии, что позволяет тестировать оптические кабели непосредственно в процессе монтажа линии. Анализируя рефлектограмму, можно определить место повреждения линии и рассчитать все основные параметры, по которым контролируется качество линии.

Основными характеристиками рефлектометра является чувствительность и пространственное разрешение. Чувствительность рефлектометра принято характеризовать величиной его динамического диапазона, а пространственной разрешение длительностью импульса и шириной мертвой зоны. Выбор длительности импульсов и времени усреднения всегда представляет собой определенный компромисс. Так при уменьшении длительности импульсов пространственное разрешение рефлектометра улучшается, а его чувствительность ухудшается. Время усреднения сигнала влияет только на чувствительность рефлектометра. Однако с увеличением времени усреднения возрастает время измерений, которое, учитывая большое количество волокон в линии передачи, не может быть слишком большим.

В этой главе анализируются основные понятия, характеризующие чувствительность рефлектометра (шумы рефлектограммы, динамический и рабочий диапазоны рефлектометра) и понятия, характеризующие его пространственной разрешение (мертвые зоны для событий и мертвые зоны по затуханию).

Раздел I.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ OTDR

§ 1. Динамический диапазон

В соответствии с рекомендацией Международной Электротехнической Комиссии (IEC – International Electrotechnical Commission) динамический диапазон рефлектометра D_{IEC} определяется как разность между уровнем сигнала обратного релеевского рассеяния в начале рефлектограммы и пиковым значением шумов в отсутствие сигнала. Уровень сигнала обратного релеевского рассеяния находится путем экстраполяции прямолинейного наклонного участка рефлектограммы в начало рефлектограммы (рис. 2.1). Уровень пикового значения шума определяется исходя из условия, что вероятность попадания шумового сигнала в доверительный интервал должна быть равна 98%. Для этого по верхнему краю шумовой дорожки проводится прямая горизонтальная линия так, чтобы её пересекал только один шумовой пик из 100.

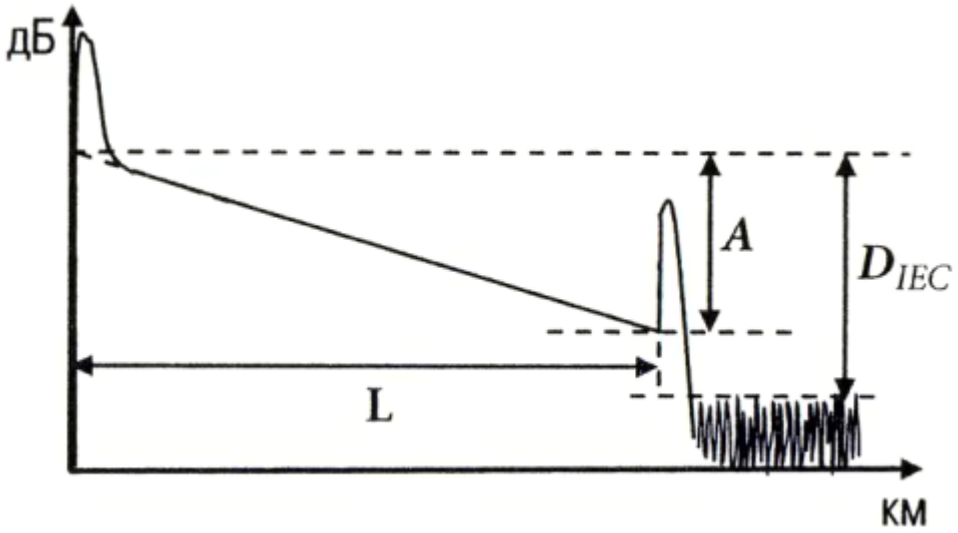


Рис. 2.1. Динамический диапазон рефлектометра $\boldsymbol{D_{IEC}}$ определяется МЭК как разница между уровнем сигнала обратного релеевского рассеяния в начале рефлектограммы и пиковым значением шума в отсутствие сигнала

Физический смысл динамического диапазона рефлектометра поясняется на рис. 2.1. Как видно из этого рисунка полные потери в линии А равны расстоянию между уровнями сигнала обратного релеевского рассеяния в начале и в конце рефлектограммы. Причем конец рефлектограммы будет виден на дисплее до тех пор, пока сигнал не уменьшиться до уровня шума. Таким образом, динамический диапазон рефлектометра равен максимально измеряемой величине полных потерь в линии. Заметим, что производители рефлектометров предпочитают определять величину шума не по его пиковому значению, а по его среднеквадратичному значению (rms - root mean square). В этом случае величина динамического диапазона $\boldsymbol{D}_{\text{rms}}$ получается на 1.8 дБ больше $\boldsymbol{D}_{\text{IEC}}$ - динамического диапазона рекомендованного МЭК (рис. 2.2).

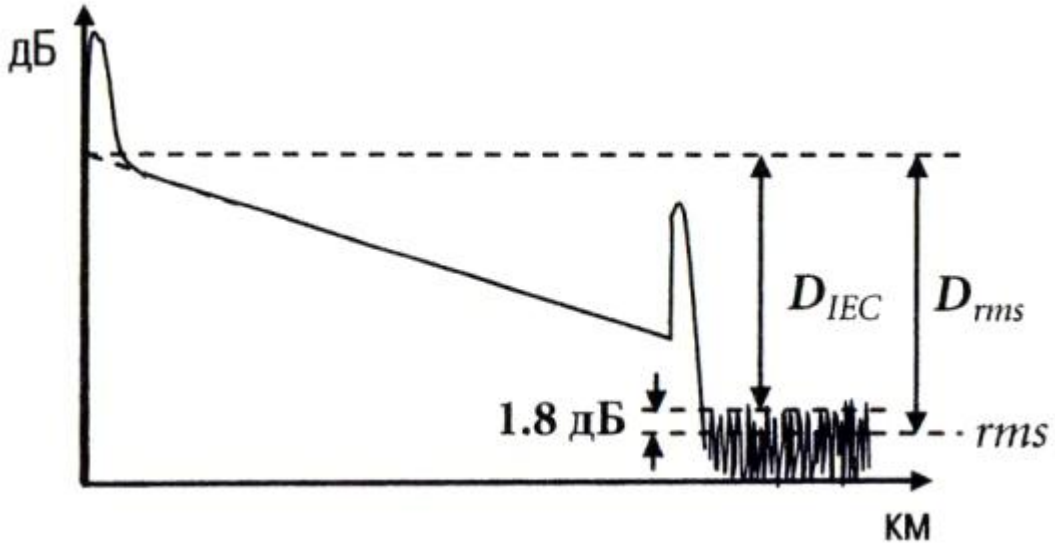


Рис. 2.2. Динамический диапазон рефлектометра $\boldsymbol{D}_{rms}$ определяется как разница между уровнем сигнала обратного релеевского рассеяния и среднеквадратичным значением шума в отсутствие сигнала. Величина динамического диапазона $\boldsymbol{D}_{rms}$ больше $\boldsymbol{D}_{IEC}$ на 1.8 дБ

Сравнение различных моделей рефлектометров часто затрудняется из-за того, что при оценке среднеквадратичного значения шума разные производители рефлектометров вычитают из пикового значения шума вместо 1.8 дБ другие величины, лежащие в пределах от 1.5 дБ до 4дБ. Поясним, почему уровень среднеквадратичного значения шума находится на 1.8 дБ ниже его пикового значения. Будем полагать, что шум распределен по нормальному (гауссовскому) закону. Тогда, как хорошо известно, вероятность пребывания в интервалах $-2\sigma...+2\sigma$ и $-3\sigma...+3\sigma$ равна, соответственно, 95 % и 99.7 %, где $\sigma \equiv$ rms шума.

Отсюда видно, что вероятности пребывания в 98% соответствует некоторый промежуточный интервал (–2.3σ...+2.3σ), или иначе получается, что в линейном масштабе среднеквадратичный уровень шума меньше пикового значения шумов в 2.3 раза (рис. 2.3). В логарифмическом масштабе (по шкале рефлектометра 5log) в 2.3 раз меньшая величина смещена вниз на 1.8 дБ (так как $5\log 2,3 = 1,8$). Поэтому и получается, что среднеквадратичное значение уровня шума находится на 1.8 дБ ниже его пикового значения.

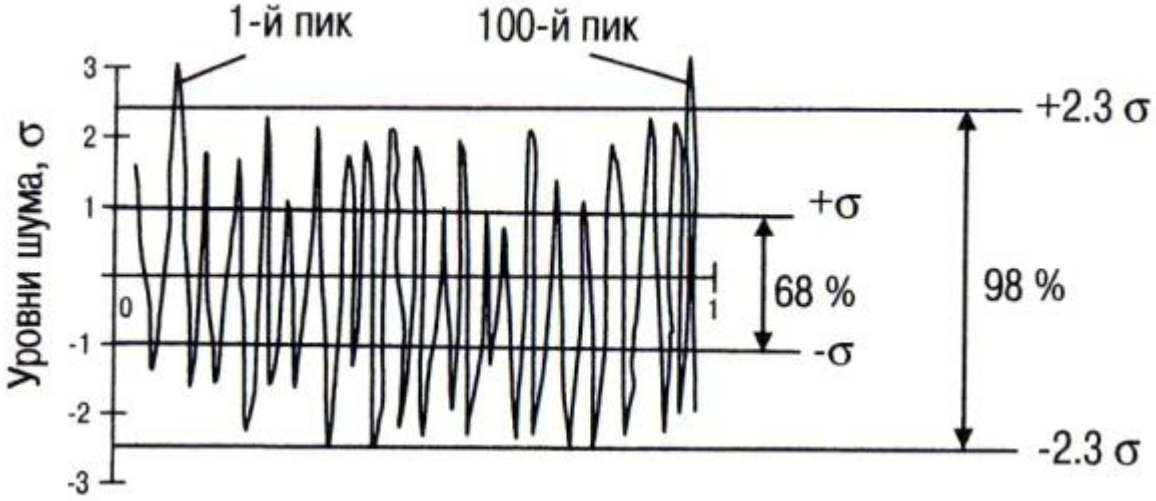


Рис. 2.3. Уровни шума в линейном масштабе.

Величина динамического диапазона зависит от параметров, устанавливаемых пользователем: длительности импульсов, времени усреднения сигнала и диапазона измеряемых длин. Так, например, при увеличении длительности импульса в 1000 раз (от τ_1 = 10 нс до τ_2 = 10 мкс) коэффициент обратного релеевского рассеяния увеличивается (по шкале рефлектометра) на $5\log\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) = 15$ дБ. Так как уровень шумов (в отсутствие сигнала) при этом не меняется, то динамический диапазон тоже увеличивается на $5\log\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) = 15$ дБ (рис. 2.4).

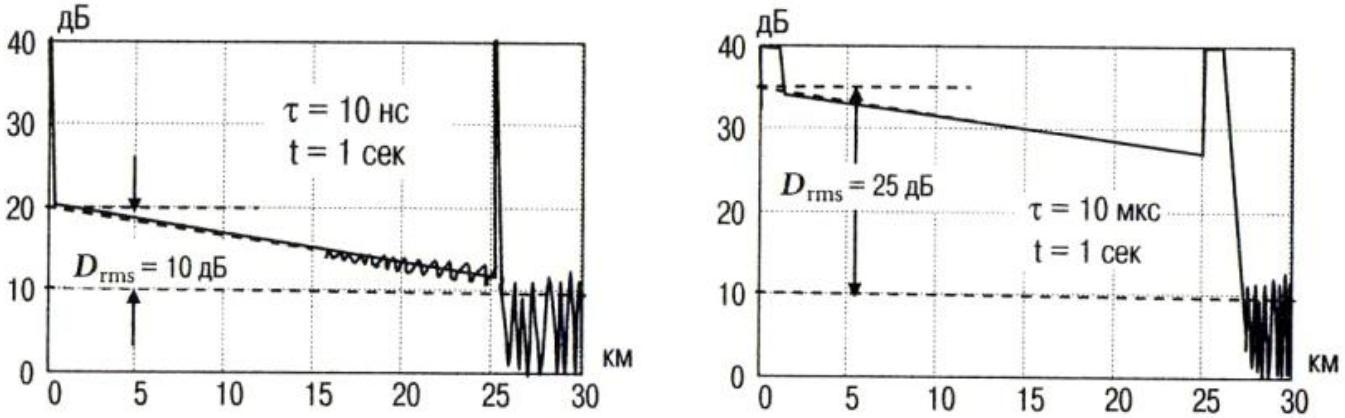


Рис. 2.4. При увеличении длительности импульсов в 1000 раз (от τ_1 = 10 нс до τ_2 = 10 мкс) динамический диапазон увеличивается на $5\log(\tau_1/\tau_2)$ = 15 дБ.

При увеличении времени усреднения коэффициент релеевского рассеяния не меняется, но зато уменьшается среднеквадратичное значение шума. Так как в первом приближении шум можно полагать белым (гауссовым), то его среднеквадратичное значение изменяется обратно пропорционально квадратному корню из времени усреднения сигнала. Это значит, что при увеличении времени усреднения от t_1 до t_2 уровень шума уменьшится (а динамический диапазон увеличится) по шкале рефлектометра всего лишь на 2.5log(t2/t1). Например, при увеличении времени усреднения в 100 раз (от t_1 = 1 сек, до t_2 = 100 сек) динамический диапазон увеличивается на $2.5\log(t_2/t_1)$ = 5 дБ (рис. 2.5). Для сравнения, при

увеличении длительности импульсов от τ_1 до τ_2 динамический диапазон возрастает на в два раза большую величину: $5\log(\tau_1/\tau_2)$.

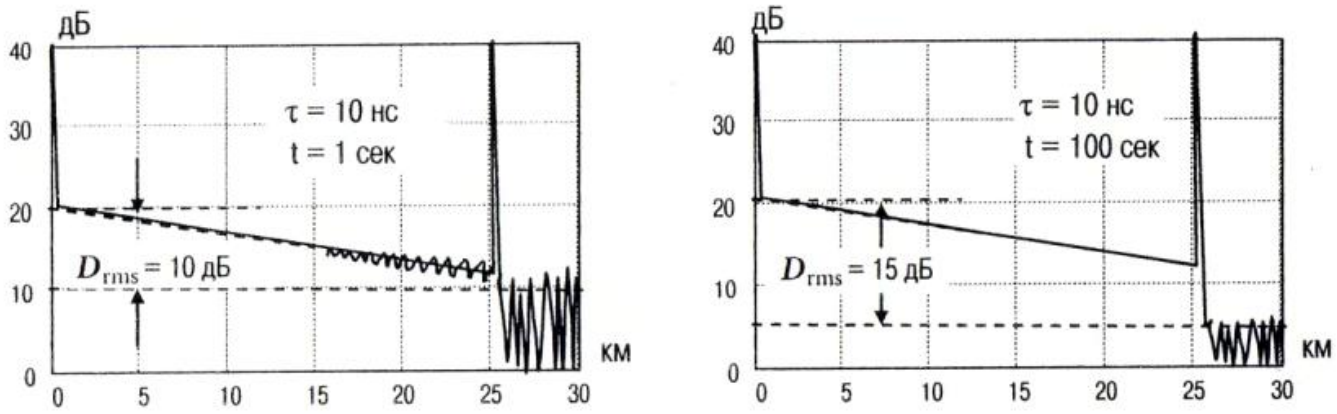


Рис. 2.5. При увеличении времени усреднения в 100 раз (от t_1 = 1 сек до t_2 = 100 сек) динамический диапазон увеличивается на $2.5\log(t_2/t_1)$ = 5 дБ

На сегодняшний день динамический диапазон является основным параметром, по которому проводится сравнение различных моделей OTDR. Так как его величина увеличивается с увеличением длительности импульсов τ и времени усреднения сигнала t, то обычно значение динамического диапазона приводят при максимальных для данного прибора значениях τ и t. Однако эти значения у разных производителей рефлектометров могут отличаться. Для того, чтобы устранить эту неоднозначность, МЭК рекомендует при сравнении динамических диапазонов рефлектометров использовать следующие величины: τ = 10 мкс и t = 3 мин. В то же время производители рефлектометров в своих спецификациях максимальное значение динамического диапазона приводят обычно при τ = 20 мкс.

§ 2. Оценка динамического диапазона

В логарифмических единицах (дБ и дБм) (мы их выделяем в тексте жирным курсивом) динамический диапазон рефлектометра равен полуразности между мощностью, рассеянной назад в начале волокна, $\boldsymbol{p}_{\text{с}}$ и эквивалентной шумовой мощностью на входе фотоприемника $\boldsymbol{p}_{\text{ш}}$ (мощностью света при которой отклик фотоприемника равен среднеквадратичному значению шума): $D_{rms} = \dfrac{p_c - p_ш}{2}$. Мощность, рассеянная назад в начале волокна, $\boldsymbol{p}_{\text{с}}$ выражается через мощность источника излучения $\boldsymbol{p}_{\text{и}}$ (введенную в волокно), потери в ответвителе $\boldsymbol{\eta}$ и коэффициент обратного релеевского рассеяния $\boldsymbol{q}$, как: $p_c = p_u - \eta + q$. А эквивалентная шумовая мощность на входе фотоприемника $\boldsymbol{p}_{\text{ш}}$ выражается через пороговую чувствительность фотоприемника $\boldsymbol{p}_{\text{пр}}$ и $\boldsymbol{b}$ – выигрыш в отношении сигнал/шум за счет усреднения импульсов: $\boldsymbol{p}_{\text{ш}} = \boldsymbol{p}_{\text{пр}} - \boldsymbol{b}$. В результате получаем выражение

$$D_{rms} = \frac{p_u - \eta + q - p_{np} + b}{2}, \qquad (2.1)$$

После того, как в рефлектометре установлен соответствующий оптический модуль, мощность источника излучения $\boldsymbol{p}_{\text{и}}$, пороговая чувствительность фотоприемника $\boldsymbol{p}_{\text{пр}}$ и величина потерь в ответвителе $\boldsymbol{\eta}$ являются уже заданными величинами. Пользователь может влиять только на коэффициент обратного релеевского рассеяния $\boldsymbol{q}$ (изменяя длительность импульсов) и на выигрыш $\boldsymbol{b}$ (изменяя время усреднения импульсов).

Коэффициент обратного релеевского рассеяния (его значение приводится в спецификации на волокно) у разных производителей волокон отличается на несколько дБ. Для оценки обычно используют значение

$$q = -80\text{дБ} + 10\log\left(\frac{\tau[\text{нс}]}{1[\text{нс}]}\right), \qquad (2.2)$$

где τ – длительность импульсов. В большинстве моделей OTDR длительность импульсов можно менять от 10 нс до 10 мкс, что позволяет увеличить коэффициент обратного релеевского рассеяния на 30 дБ и, соответственно, динамический диапазон рефлектометра на 15 дБ.

Выигрыш в отношении сигнал/шум ***b*** (в предположении, что шум белый) пропорционален квадратному корню из числа усредняемых импульсов: $b = 10\log\sqrt{N}$. Учитывая, что на обработку затрачивается около 10 % времени, число этих импульсов $N = \frac{0.9t}{T}$, где t – время усреднения, а T – период следования импульсов. В результате получаем, что выигрыш в отношении сигнал/шум равен $b = 5\log\frac{0.9t}{T}$. Таким образом, для оценки величины динамического диапазона надо знать не только время усреднения импульсов t, но и период их следования T. Период следования импульсов можно оценить, используя тот факт, что при измерении величины динамического диапазона OTDR разработчики рекомендуют подключать к нему волокно длиной 25 км (рис. 2.6).

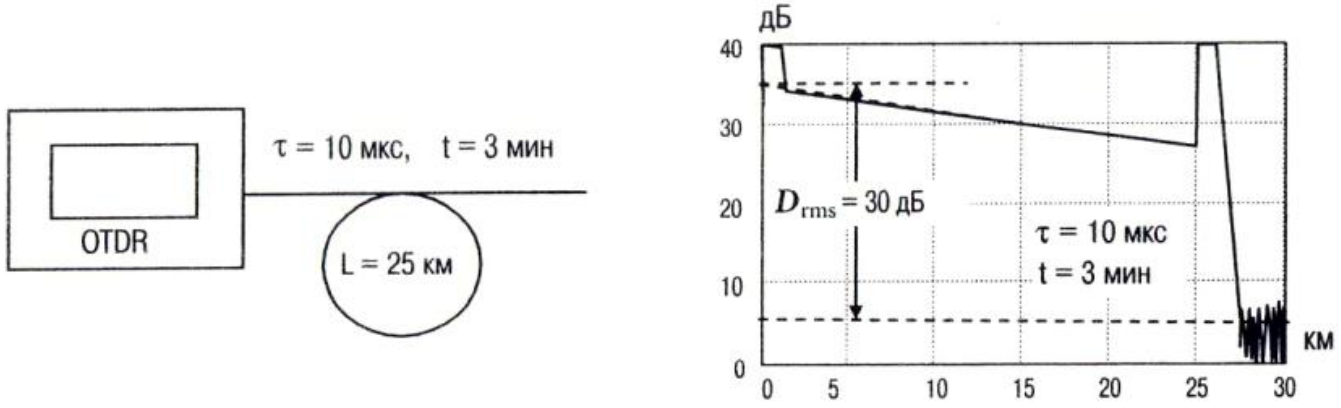


Рис. 2.6. Динамический диапазон определяется при длине волокна 25 км, длительности импульса 10 мкс и времени усреднения сигнала 3 мин

Как известно для того, чтобы импульсы, отраженные от начала и конца волокна не накладывались друг на друга, диапазон измеряемых длин должен быть на 10...20 % больше длины волокна. Для оценки положим, что диапазон измеряемых длин устанавливается равным 30 км. Учитывая, что коэффициент пропорциональности между временем запаздывания и длиной волокна равен 10 мкс/км, находим, что период следования импульсов T равен 300 мкс. При этом число импульсов, усредняемых за время t = 3 мин., равно $N = \frac{0.9t}{T} = \frac{0.9\cdot 180}{3\cdot 10^{-4}} = 5.4\cdot 10^5$, а выигрыш в отношении сигнал/шум: $b = 10\log\sqrt{N} \cong 29$ дБ.

Оценим типичное значение величины динамического диапазона рефлектометра. При этом, как уже говорилось, следует полагать, что τ = 10 мкс, t = 3 мин и T = 300 мкс. Мы уже нашли, что при этих параметрах: ***q*** = –40 дБ и ***b*** = 29 дБ. Потери при двукратном проходе через 3 дБ ответвитель ***η*** примерно равны 6 дБ. Далее положим, что $\boldsymbol{p}_{\text{и}}$ = 20 дБм. При большей мощности импульсов света в волокне становятся заметными искажения, вызванные нелинейным рассеянием света в волокне (эффекты Рамана и Бриллюэна) и уменьшается срок службы лазера и фотоприемника. Фотоприемник состоит из лавинного фотодиода и трансимпедансного усилителя (операционный усилитель с отрицательной обратной связью). Такой усилитель обеспечивает большой динамический диапазон, низкий уровень шумов и позволяет легко изменять величину коэффициента усиления и ширину полосы усилителя.

В OTDR фотоприемник может работать в трех различных режимах: в стандартном режиме, в режиме максимального динамического диапазона (узкая полоса частот) и в режиме максимального разрешения (широкая полоса частот). При τ = 10 мкс фотоприемник работает обычно режиме максимального динамического диапазона (полоса частот ~ 1 МГц). При типичном значении пороговой чувствительность лавинного фотодиода 10^{-14} Вт/Гц$^{1/2}$ и ширине полосы 1 МГц получаем, что $\boldsymbol{p}_{\text{пр}}$ = –80 дБм. Подставляя в (2.1) значения: $\boldsymbol{p}_{\text{и}}$ = 20 дБм, $\boldsymbol{\eta}$ = 6 дБ, $\boldsymbol{q}$ = –40 дБ, $\boldsymbol{p}_{\text{пр}}$ = –80 дБм и $\boldsymbol{b}$ = 29 дБ находим: $D_{rms} = \dfrac{p_u - \eta + q - p_{np} + b}{2} = 41{,}5$ дБ.

Зависимость $\boldsymbol{D}_{\text{rms}}$ от времени усреднения сигнала, и длительности импульсов приведена на рис. 2.7.

Заметим, что приведенная нами оценка динамического диапазона не является предельной. Оптические потери в схеме можно уменьшить почти на 5 дБ, используя вместо ответвителя циркулятор (значительно более дорогое устройство). Мощность источника можно увеличить до 23 дБ (прежде чем станут, заметны нелинейные искажения). Можно также улучшить и пороговую чувствительность, так как в рассмотренном нами примере она почти на 10 дБ хуже квантового предела. Так в последних моделях OTDR динамический диапазон удалось увеличить до 50 дБ.

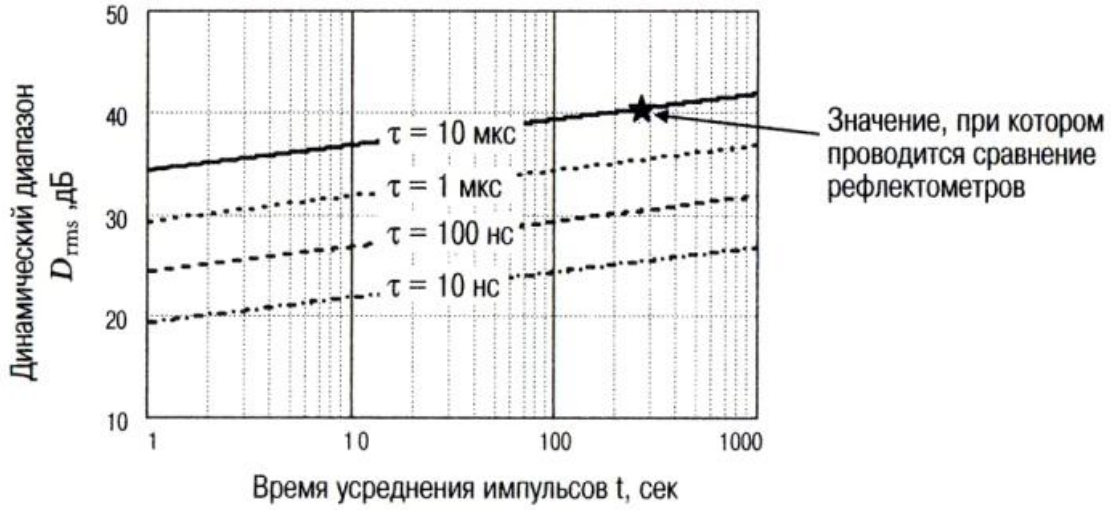


Рис. 2.7. Зависимость динамического диапазона рефлектометра $\boldsymbol{D}_{rms}$ от времени усреднения t и длительности импульсов τ

Для сравнения в таблице № 2.1 приведены значения динамических диапазонов излучательных модулей mini-OTDR производства компании Agilent. Как видно из этой таблицы, наибольший динамический диапазон 42/41 дБ (при τ = 10 мкс и λ = 1310/1550 нм) обеспечивает оптический модуль E6008B, предназначенный для использования в магистральных линиях. Такой большой динамический диапазон достигается, в первую очередь, за счет использования более мощного лазера. Заметно меньшую величину динамического диапазона (30 дБ) обеспечивает оптический модуль E6004A, предназначенный для использования в городских линиях. В нем используется менее мощный лазер, служит этот модуль дольше и стоит намного меньше чем E6008B.

Таблица № 2.1. Технические характеристики E6000C с различными оптическими модулями (динамический диапазон $\boldsymbol{D}_{rms}$ измерен при времени усреднения t = 3 мин)

Марка модуля	**E6004A**				**E6003A**				**E6003B**				
Длина волны, нм	1310/1550*25				1310/1550±25				1310/1550±25				
Тип волокна	Одномодовое				Одномодовое				Одномодовое				
Применение	Городские линии				Городские и магистральные				Городские и магистральные				
Длительность импульса	10 нс	100 нс	1 мкс	10 мкс	10 нс	100 нс	1 мкс	10 мкс	10 нс	100 нс	1 мкс	10 мкс	20 мкс
Динамический диапазон, дБ	13/13	18/18	23/23	30/30	19/17	24/22	30/29	35/34	19/17	24/22	30/29	38/37	40/39

Марка модуля	Б5001А				Е6005А				Е6008В				
Длина волны, нм	1310±25				850/1300±30				1310/1550±25				
Тип волокна	Одномодовое				Многомодовое				Одномодовое				
Применение	Городские линии				Локальные сети				Магистральные линии				
Длительность импульса	10 нс	100 нс	1 мкс	10 мкс	10 нс	100 нс	1 мкс	10 мкс	10 нс	100 нс	1 мкс	10 мкс	20 мкс
Динамический диапазон, дБ	13	18	23	30	19/17	26/22	-/28	-/34	24/22	29/27	35/34	42/41	45/43

Величина динамического диапазона рефлектометра, измеренная при τ = 10 мкс и t = 3 мин., используется при сравнении различных типов OTDR. Измерения же часто проводятся при меньшем значении длительности импульсов и меньшем времени усреднения. Так, например, при входном и предмонтажном контроле оптических кабелей измерения проводятся обычно при τ = 100 нс и t = 15 сек. При этом используется оптический модуль с динамическим диапазоном 30…35 дБ.

Конструируют mini-OTDR обычно в виде двух модулей: базового и оптического модуля. Модульный дизайн OTDR позволяет пользователю устанавливать в своем рефлектометре оптические модули с различным динамическим диапазоном, соответственно, с различной стоимостью. Казалось бы, что во всех случаях можно было бы использовать только один оптический модуль с максимальным динамическим диапазоном, но тогда существенно возрастает цена и уменьшается срок службы рефлектометра. Для сравнения, стоимость одного оптического модуля с динамическим диапазоном порядка 45дБ близка к стоимости минимальной конфигурации рефлектометра (основной блок и оптический модуль с динамическим диапазоном порядка 35 дБ).

§ 3. Рабочий диапазон

Возможность обнаружения малой неоднородности ограничивается мертвой зоной в начале рефлектограммы и шумами фотоприемника в конце рефлектограммы. Поэтому при измерениях используется только часть динамического диапазона рефлектометра (рис. 2.8).

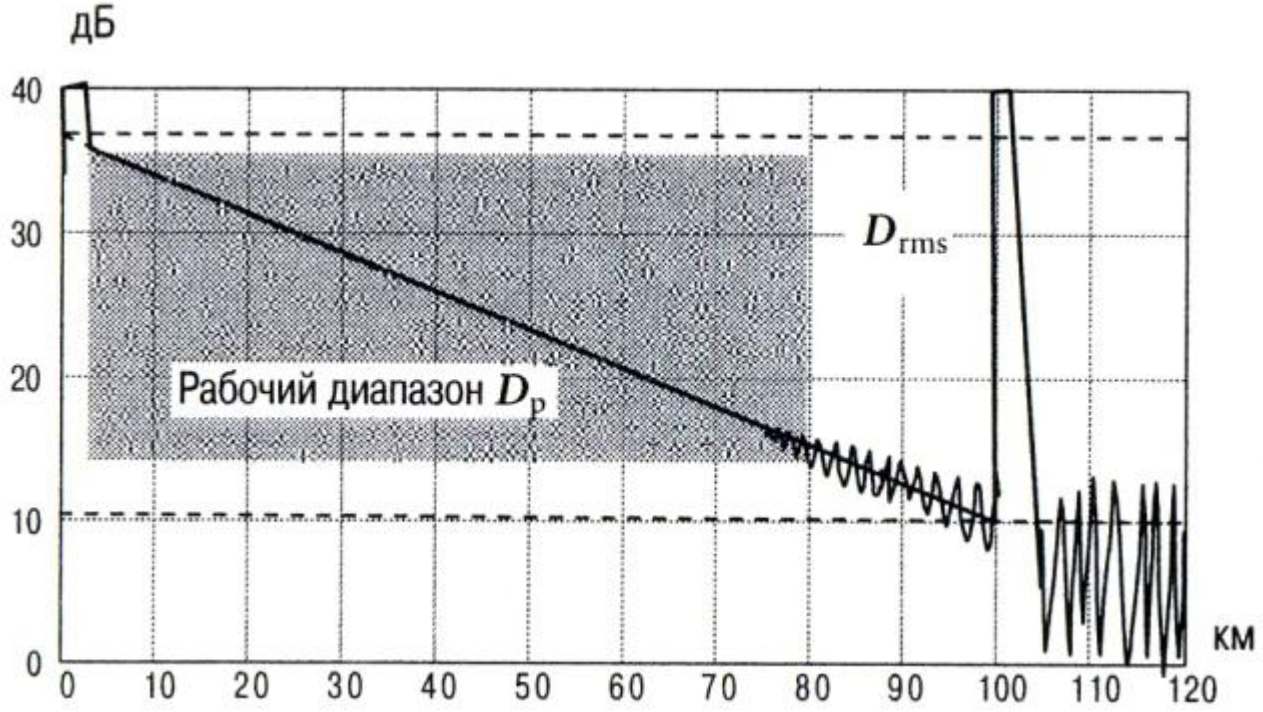


Рис. 2.8. Рабочий диапазон D_p

Компания Bellcore (теперь Telecordia) определяет величину рабочего диапазона (Bellcore measurement range) D_p как максимальные потери, которыми может обладать участок линии передачи между OTDR и измеряемой неоднородностью с потерями 0.5 дБ

(рис. 2.9). При этом результаты 4-х (из 5-и) измерений потерь в этой неоднородности не должны отличаться от 0.5 дБ более чем на 0.1 дБ.

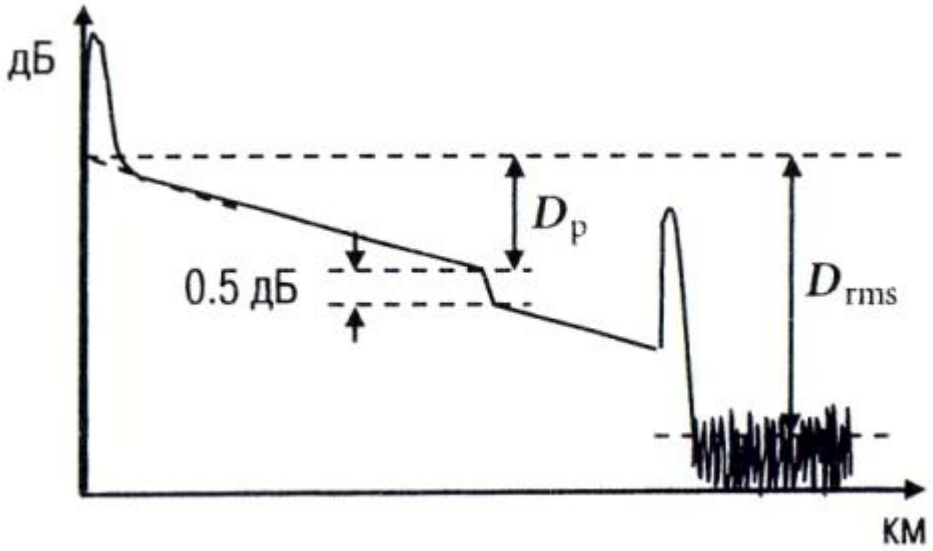


Рис. 2.9. Рабочий диапазон D_p определяется как разница между уровнем сигнала в начале рефлектограммы и уровнем сигнала в том месте рефлектограммы, где можно измерить локальное изменение потерь на 0.5 дБ с точностью 0.1 дБ.

Для измерения величины D_p необходимо создать в волокне не отражающую неоднородность с потерями равными 0.5 дБ. Эта неоднородность должна быть удалена от конца волокна на расстояние, большее ширины мертвой зоны по затуханию. Компания Telecordia разработала такой имитатор потерь в сростке волокон (рис. 2.10). В нем используется 3 дБ ответвитель, оптический аттенюатор и две катушки с волокном. На рефлектограмме в месте расположения имитатора потерь видны ступеньки в точках удаленных от начала волокна, соответственно, на расстояния L_0, L_1, L_2. На расстоянии L_0 находится ответвитель, а на расстояниях L_1 и L_2 концы волокон намотанных на катушки. На концах волокон для того, чтобы избавится от сигнала, вызванного отражением от торца, сделаны петли диаметром порядка 1 см. Ступенька в точке L_1 имитирует потери в сварном соединении волокон $a_и$.

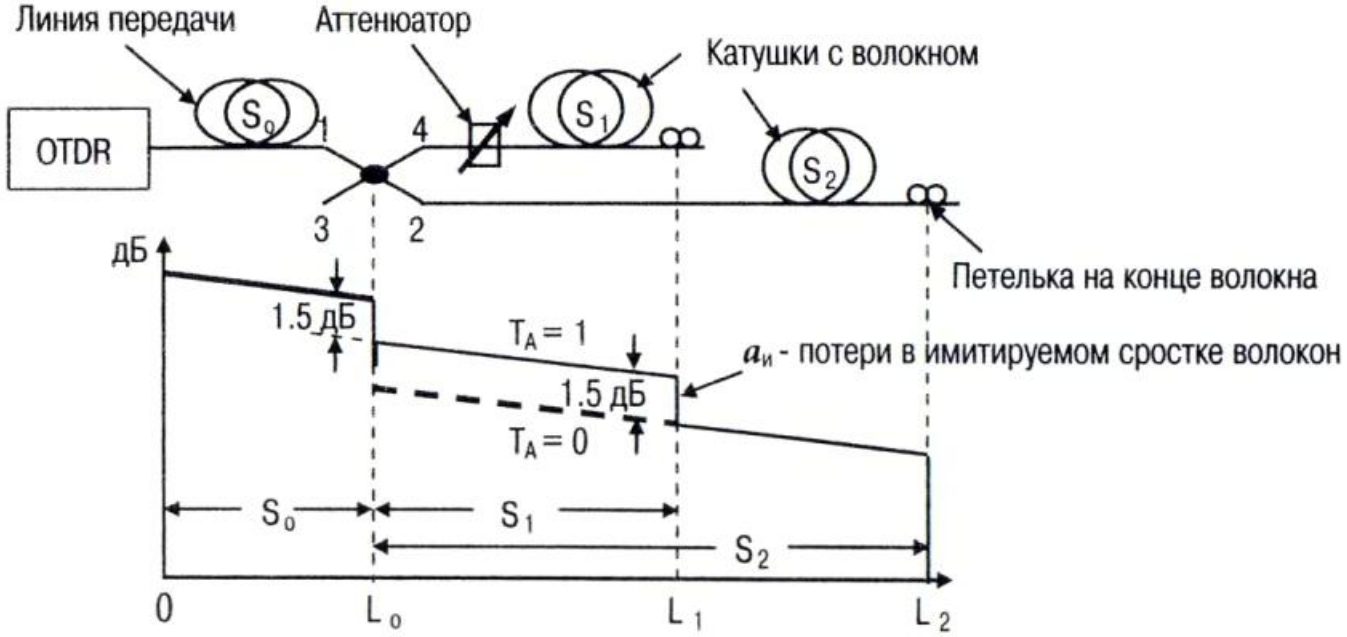


Рис. 2.10. Имитатор потерь в сростке волокон и его рефлектограмма

Величины ступенек в точках L_0 и L_1 зависят от коэффициента пропускания аттенюатора T_A. При $T_A = 0$ свет проходит только через порты ответвителя 1 и 2 и распространяется только в катушке S_2 с более длинным волокном. Поэтому ступенька наблюдается только в точке L_0, где расположен ответвитель, и в точке L_2 на конце волокна

S_2. При увеличении T_A от 0 до 1 ступенька в точке L_0 уменьшается от 3 дБ до 1.5 дБ, а в точке L_1 потери $\boldsymbol{a}_и$ увеличиваются от 0 дБ до 1.5 дБ. Зависимость $\boldsymbol{a}_и$ от $\boldsymbol{A} = -10\log T_A$ изображена на рис 2.11.

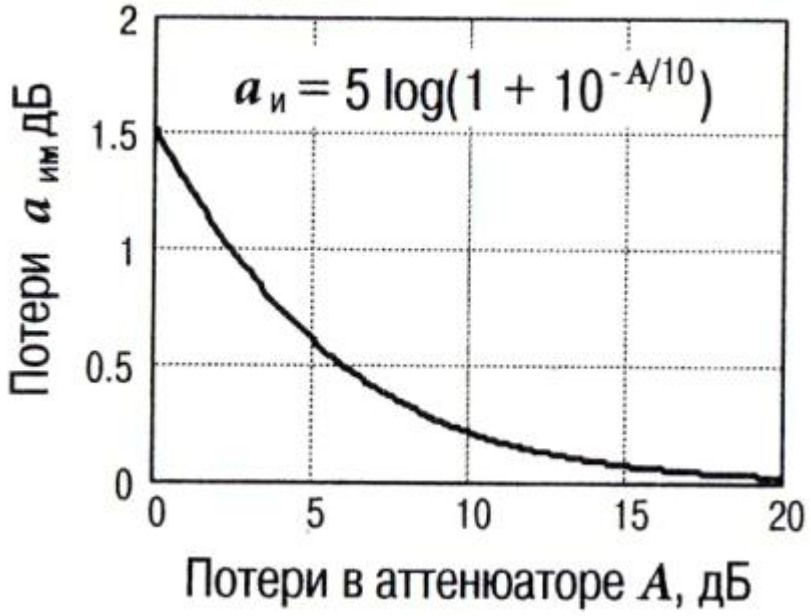


Рис. 2.11. Зависимость потерь в имитируемом сварном соединении волокон $\boldsymbol{a}_и$ от потерь, вносимых оптическим аттенюатором $A = -10\log T_A$

Хотя рабочий диапазон более достоверно характеризует возможность измерения малых потерь, но требует применения более сложного оборудованиия и больших временных затрат (таблица № 2.2) и, поэтому практически не используется.

Таблица № 2.2. Сравнение динамического и рабочего диапазона.

Динамический диапазон D_{rms}	**Рабочий диапазон D_p**
• Легко измерить • Для измерений нужна только катушка с волокном • Хорошая повторяемость результатов измерений • Малые временные затраты • Достаточно одного измерения • Невысокая точность оценки возможности измерений малых потерь в сварных соединениях волокон	• Трудно измерить • Для измерений необходимо специальное оборудование • Результаты измерений требуют специальной обработки • Большие временные затраты • Для того, чтобы удовлетворить требованиям спецификации, необходимо провести не менее 4-х измерений • Высокая точность оценки возможности измерений малых потерь в сварных соединениях волокон

§ 4. Отношение сигнал/шум

При выборе модели OTDR пользователь, прежде всего, должен оценить, исходя из величины полных потерь в линии, требуемую величину динамического диапазона рефлектометра. Основным критерием при этом является возможность обнаружения и измерения потерь в сростках волокон, находящихся в конце линии. Задача формулируется следующим образом: оценить величину динамического диапазона рефлектометра $\boldsymbol{D}_{rms}$, необходимую для обнаружения потерь в сростках волокон, величиной $\boldsymbol{a}$ при полных потерях в линии, равных $\boldsymbol{A}$ (рис. 2.12).

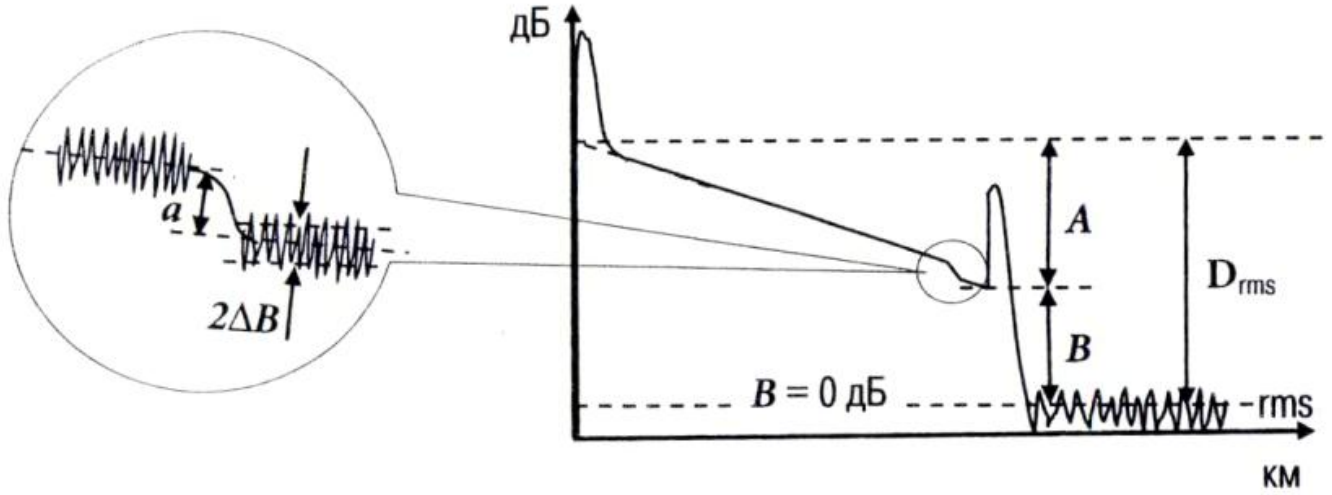
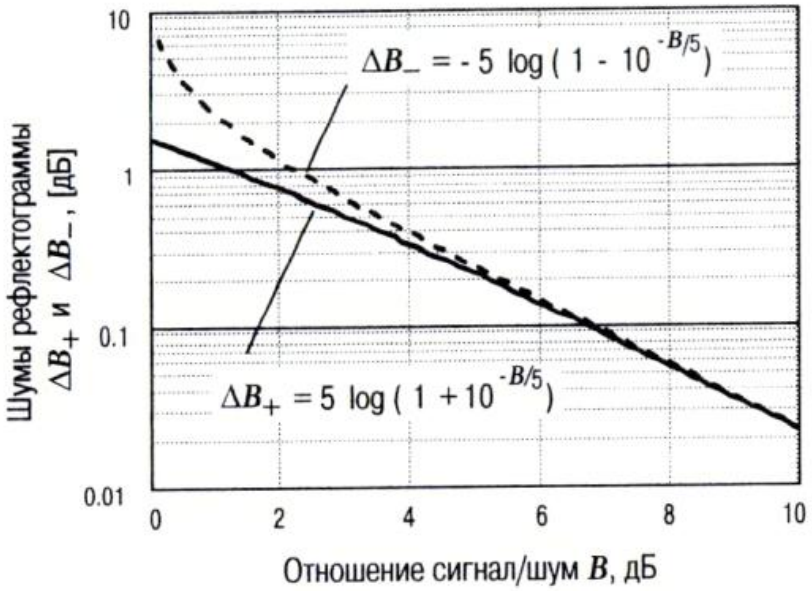


*Рис. 2.12. Схема поясняющая постановку задачи в определении требуемой величины динамического диапазона: найти величину D_{rms} исходя из заданных значений **A** и **a***

Так как возможность измерения малых потерь ограничивается, прежде всего, шумами рефлектограммы ΔB, то задача сводится к нахождению зависимости величины этих шумов от отношения сигнал/шум в рефлектограмме B. Отношение сигнал/шум B выражается через мощность, рассеянную в точке z назад в рефлектометр P_c и эквивалентную шумовую мощность на входе фотоприемника $P_ш$.

$$B = 5\log\frac{P_c}{P_ш} = \frac{p_c - p_ш}{2}, \qquad (2.3)$$

Шумы рефлектограммы (или, как часто говорят, неопределенность рефлектограммы) также выражается через отношение $P_c/P_ш$: $\Delta B_+ = 5\log[(P_c + P_ш)/P_c]$ и $\Delta B_- = 5\log[P_c/(P_c - P_ш)]$. Исключив с помощью (2.3) отношение $P_c/P_ш$ выразим ΔB_+ и ΔB_- через B: $\Delta B_+ = 5\log\left(1+10^{-B/5}\right)$ и $\Delta B_- = -5\log\left(1-10^{-B/5}\right)$. Зависимости ΔB_+ и ΔB_- от B приведены на рис. 2.13.



B	ΔB_+	ΔB_-, [дБ]
0	1.505	
1	1.062	2.165
2	0.728	1.102
3	0.487	0.628
4	0.319	0.375
5	0.207	0.229
6	0.133	0.142
7	0.085	0.088
8	0.054	0.055
9	0.034	0.035
10	0.022	0.022
11	0.014	0.014

Рис. 2.13. Зависимость шумов рефлектограммы от отношения сигнал/шум

Как видно из рис. 2.13, шумы рефлектограммы быстро уменьшается с увеличением отношения сигнал/шум. Причем при малом значении сигнал/шум ($B < 5$) неопределенность отклика асимметрична ($\Delta B_+ < \Delta B_-$). При $B > 5$ неопределенность отклика симметрична и

$\Delta B_+ \cong \Delta B_- \equiv \Delta \cong \frac{2P_ш}{P_c} \cong 2 \cdot 10^{-B/5}$. Это означает, что на не слишком зашумленном участке рефлектограммы (как раз там, где можно будет измерить малое приращение потерь) шумы рефлектограммы (в логарифмической шкале) распределены так же, как и в линейной шкале (примерно по нормальному закону). При этом среднеквадратичное значение шумов рефлектограммы экспоненциально убывает с увеличением отношения сигнал/шум.

Следующая часть задачи состоит в нахождении величины отношения сигнал/шум в рефлектограмме. Как видно из (2.3), уровень $\boldsymbol{B} = 0$ совпадает с уровнем среднеквадратичного значения шумов в отсутствие сигнала (рис. 2.12). Теперь надо найти, как изменяется величина $\boldsymbol{B} = (\boldsymbol{p}_с - \boldsymbol{p}_ш)/2$ при увеличении $\boldsymbol{p}_с$. Проблема состоит в том, что величина $\boldsymbol{B}$ может изменяться не только за счет изменения $\boldsymbol{p}_с$ но и за счет изменения $\boldsymbol{p}_ш$, так $\boldsymbol{p}_ш$ зависит, вообще говоря, от уровня засветки фотоприемника.

В конце рефлектограммы расчет величины отношения сигнал/шум существенно упрощается. На этом участке уровень засветки фотоприемника мал и $\boldsymbol{p}_ш$ не зависит от $\boldsymbol{p}_с$. Действительно, сигнал в конце рефлектограммы превышает уровень шумов фотоприемника только за счет того, что происходит многократное усреднение сигнала. При этом выигрыш в отношении сигнал/шум, как было показано в §3, может достигать 30 дБ. Это значит, что вплоть до уровня, находящегося по шкале рефлектометра на 15 дБ выше уровня $\boldsymbol{B} = 0$ дБ, можно полагать, что $\boldsymbol{p}_ш$ не зависит от $\boldsymbol{p}_с$ и равно значению получаемому в отсутствие сигнала. В этом приближении отношение сигнал/шум будет изменяться пропорционально изменению величины $\boldsymbol{p}_с$. Поэтому, если положить, что на вертикальной шкале рефлектометра положение нуля совпадает со среднеквадратичным значением шумов фотоприемника в отсутствие сигнала, то по ней можно отсчитывать величину отношения сигнал/шум в единицах дБ.

В качестве иллюстрации рассмотрим, как изменяются отношение сигнал/шум и огибающие шумовой дорожки в рефлектограмме ($\boldsymbol{B}_+ = \boldsymbol{B} + \Delta\boldsymbol{B}_+$ и $\boldsymbol{B}_- = \boldsymbol{B} - \Delta\boldsymbol{B}_-$) в зависимости от расстояния до точки рассеяния импульсов света в волокне z. При этом будем полагать, что потери постоянны по длине волокна и нет отражения от торцов волокна. В таком волокне рассеянная назад мощность изменяется по линейному закону: $\boldsymbol{p}_с(z) = \boldsymbol{p}_с(0) - \alpha z$. Учитывая, что $\boldsymbol{D}_{rms} = (\boldsymbol{p}_с(0) - \boldsymbol{p}_ш)/2$, получаем зависимость отношения сигнал/шум от z: $\boldsymbol{B}(z) = \boldsymbol{D}_{rms} - \alpha z$. Огибающие шумовой дорожки в рефлектограмме с помощью (2.3) выражаются через $\boldsymbol{B}(z)$: $\boldsymbol{B}_+(z) = 5\log(1 + 10^{\boldsymbol{B}(z)/5})$ и $\boldsymbol{B}_(z) = 5\log(10^{\boldsymbol{B}(z)/5} - 1)$. Зависимости $B_+(z)$, $B_-(z)$ и $B(z)$ при $\boldsymbol{D}_{rms} = 15$ дБ и $\alpha = 0.25$ дБ/км представлены на рис. 2. 14

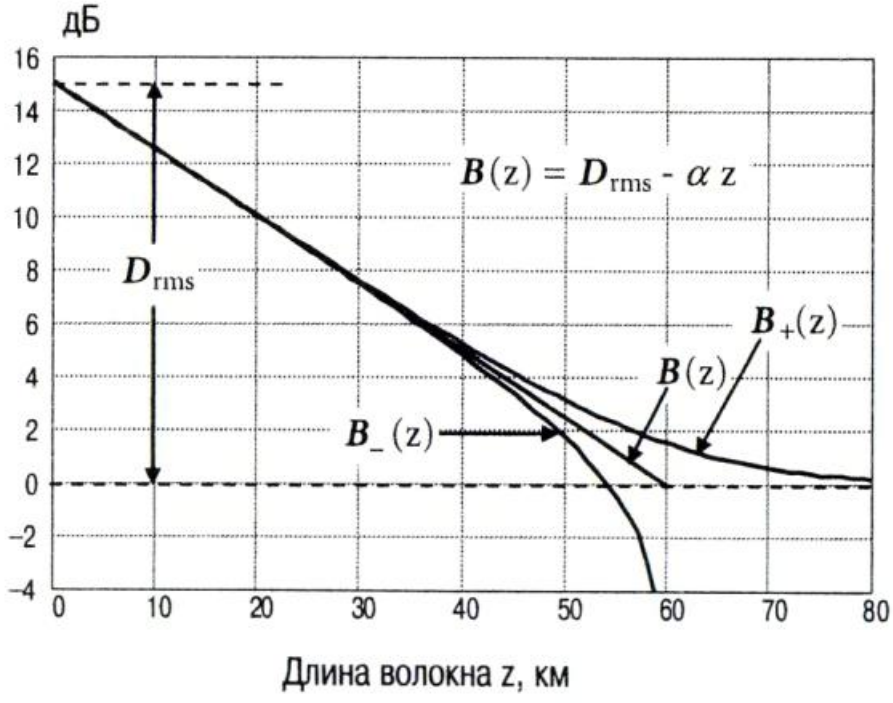


Рис. 2.14 Модель рефлектограммы волокна с постоянными по длине потерями

Теперь остается найти зависимость требуемой величины отношения сигнал/шум B от величины потерь в сварном соединении волокон ***a***. Как известно, обнаружить малый сигнал на фоне шумов можно только с определенной вероятностью. Так, вероятность того, что измеренная величина потерь, лежит в интервале ±Δ***B*** (rms шума) равна 68 %, а вероятность того, что она лежит в интервале ±2Δ***B*** равна 95%. Полагая, что величина потерь в сварном соединении волокон ***a*** равна 2Δ***B***, с помощью приближенного соотношения $\Delta B \approx 2P_ш/P_c$ и выражения (2.3) найдем требуемую величину отношения сигнал/шум

$$B = 5\log\frac{4}{a} \qquad (2.4)$$

Зависимость требуемой величины отношения сигнал/шум от величины потерь в сварном соединении волокон изображена на рис. 2.15.

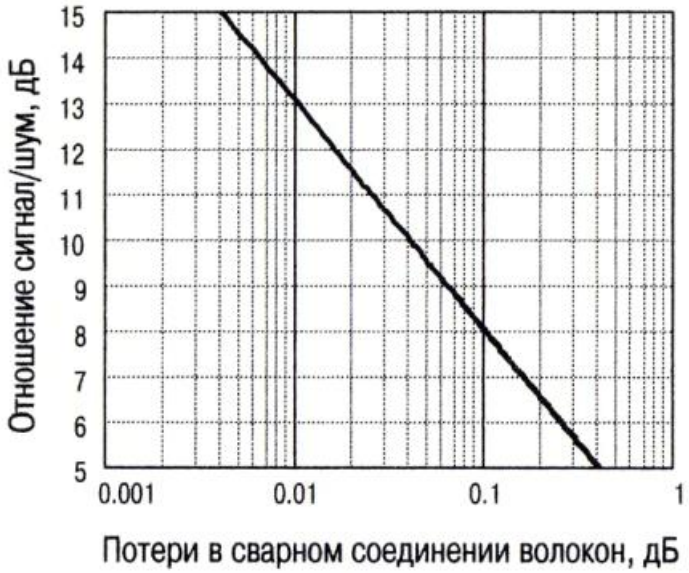


Рис. 2.15. Зависимость требуемой величины отношения сигнал/шум от величины потерь в сварном соединении волокон.

Рассмотрим пример (рис. 2.16). Пусть имеется линия длиной 150 км с потерями в волокне 0.20 дБ/км. Полные потери в ней A = 0.20 дБ/км × 150 км = 30 дБ. Оценим величину динамического диапазона рефлектометра, необходимого для измерения потерь в сварных соединениях волокон порядка 0.02 дБ. Из рис. 2.15 находим, что отношение сигнал шум в конце рефлектограммы ***B*** должно быть около 12 дБ. Отсюда получаем, что $\boldsymbol{D}_{rms}$ = ***A*** + ***B*** = 30 + 12 = 42 дБ.

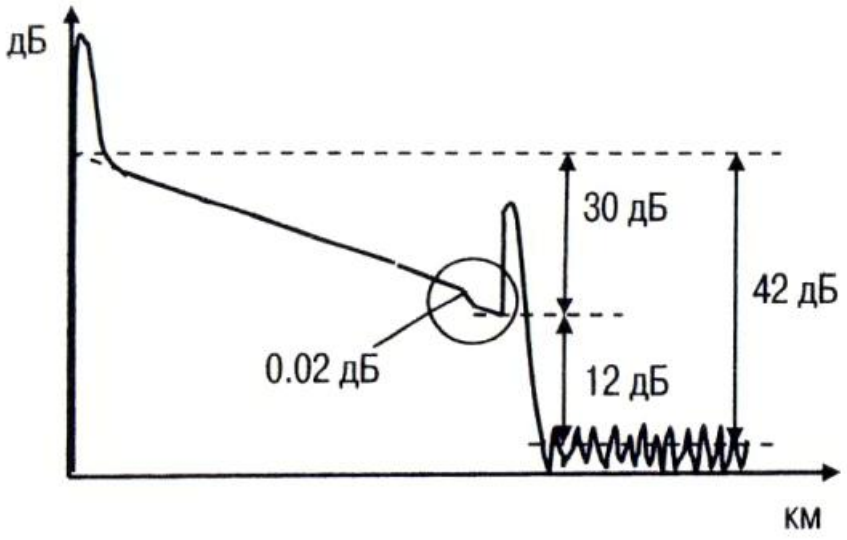


Рис. 2.16. Пример расчета динамического диапазона рефлектометра, необходимого для измерения потерь в сварных соединениях волокон порядка 0.02 дБ в линии передачи с полными потерями 30 дБ.

§ 5. Шумы в начале рефлектограммы

При оценке отношения сигнал/шум в конце рефлектограммы мы исходили из условия, что уровень засветки фотоприемника мал и, поэтому шумы фотоприемника не зависят от мощности излучения. Однако в начале рефлектограммы уровень засветки фотоприемника уже нельзя полагать малым. На этом участке рефлектограммы преобладающими становятся шумы, вызванные флуктуациями мощности излучения. Эти флуктуации обусловлены, в основном, двумя эффектами: когерентным рассеянием света в волокне и поляризационной анизотропией волокна и ответвителя.

Рассмотрим в начале шум, вызванный когерентным рассеянием света. В каждый момент времени на фотоприемник приходит волна, рассеянная с участка волокна равного полуширине импульса света в волокне. Она представляет собой сумму волн, рассеянных в отдельных релеевских центрах (флуктуациях показателя преломления волокна). Причем в зависимости от длины когерентности источника излучения суммируются или амплитуды этих волн или их мощности. Когда длина когерентности лазерного диода превышает ширину импульса света в волокне, то наблюдается эффект когерентного рассеяния света и надо суммировать амплитуды волн. Амплитуду такой суммарной волны можно представить как сумму векторов со случайной амплитудой и фазой (рис. 2.17).

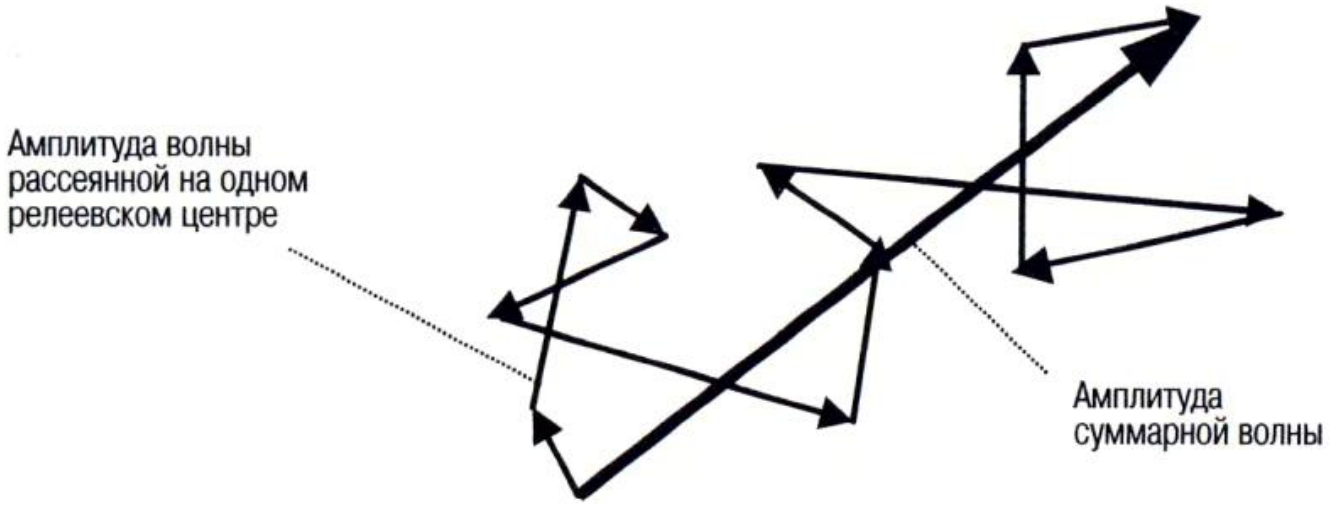


Рис. 2.17. Сложение векторов со случайными амплитудами и фазами

При когерентном рассеянии света суммарная амплитуда волны изменяется вдоль волокна случайным образом от своего максимального значения до нуля. В этом случае относительная флуктуация мощности рассеянной волны - порядка единицы и рефлектограмма сильно зашумлена. Однако длина когерентности лазерного диода, используемого в качестве источника излучения в OTDR (~ 1...10 мм), обычно заметно меньше полуширины импульса света в волокне. Так, например, для самого короткого импульса длительностью τ = 10 нс полуширина импульса равна: $\tau \frac{v_r}{2} = 10 \text{ нс} \times 0{,}1 \text{ м/нс} = 1 \text{ м}.$

Волны, рассеянные с участков волокна, отстоящих друг от друга на расстоянии большем длины когерентности, уже не интерферируют между собой. Поэтому при расчете мощности суммарной волны нужно суммировать не амплитуды, а мощности этих волн. При этом относительная флуктуация мощности рассеянных волн уменьшается до величины порядка $\frac{1}{\sqrt{N}}$, где N – число некоррелированных центров рассеяния в волокне. Когерентные шумы могут быть видны на начальном участке рефлектограммы, где вклад собственных шумов фотоприемника пренебрежимо мал. Причем, в отличие от шумов фотоприемника, их нельзя уменьшить, увеличив время усреднения сигнала.

Оценим величину когерентных шумов для типичного источника излучения в OTDR. **К источникам излучения, применяемым в OTDR, предъявляются примерно те же требования, что и к источникам излучения для линий связи – они должны излучать**

короткие импульсы большой мощности на длинах волн, попадающих в одно из окон прозрачности волокна. За одним отличием – если для линий передачи требуются источники с узким спектром (с большой длиной когерентности), то для применения в OTDR, наоборот, необходимы источники с малой длиной когерентности.

В OTDR применяются наиболее простые типы полупроводниковых лазеров - многомодовые FP лазеры (лазерные диоды с резонатором типа Фабри-Перо) на основе одинарной гетероструктуры (в последних моделях OTDR используются также лазеры с квантовыми ямами). В лазерах на λ = 850 нм используется тройное соединение AlAsGa, а в лазерах на λ = 1310 нм, 1550 нм и 1625 нм четверное соединение InGaAsP. Резонатор в FP лазере образуется торцевыми поверхностями гетероструктуры. Длина резонатора порядка 100...500 мкм, ширина активной зоны 5... 10 мкм, а её высота 0.1...0.2 мкм. Лазер с таким резонатором обычно работает в многомодовом режиме, излучая несколько продольных мод рис. 2.18.

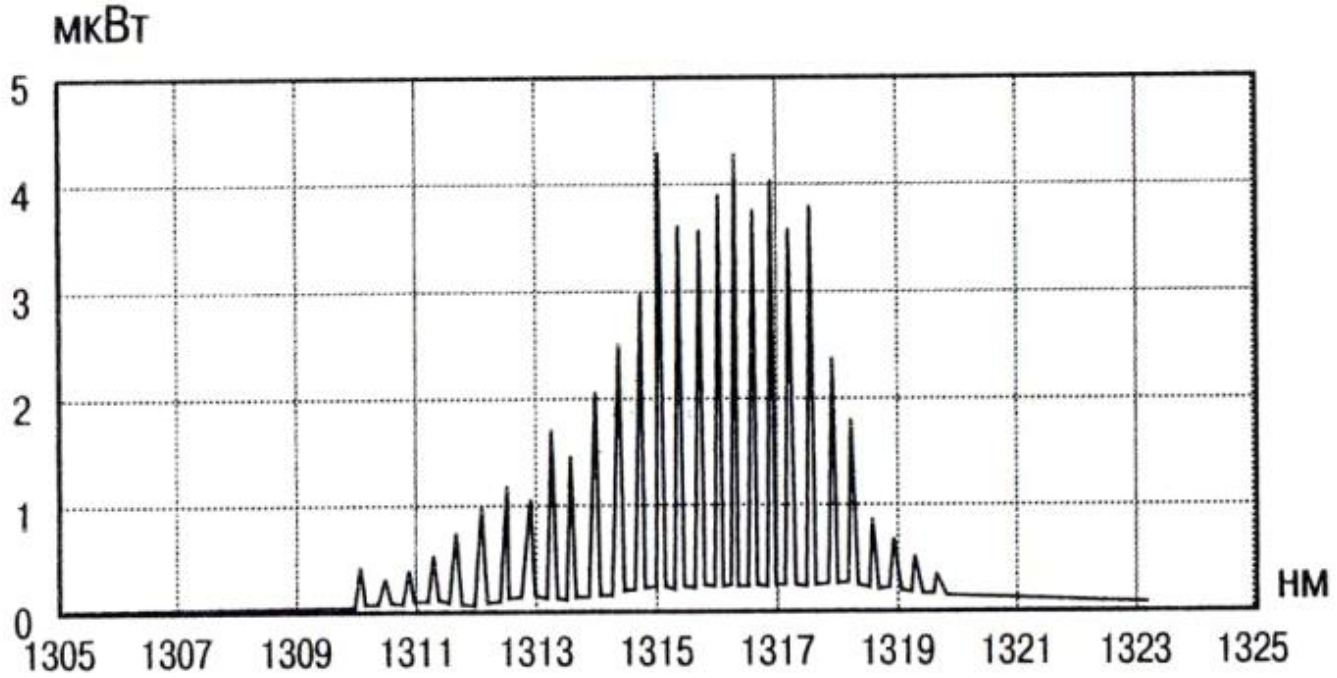


Рис. 2.18. Типичный спектр излучения FP лазера (рефлектометр AQ7140)

Из рис. 2.18 видно, что на λ = 1310 нм число продольных мод в FP лазере, дающих заметный вклад в результирующий сигнал, $m \approx 10$, а ширина линии $\Delta\lambda \approx 0.2$ нм. Длина когерентности излучения лазера в волокне равна: $L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda n}$, где $n \approx 1.46$ – показатель преломления кварцевого стекла. При λ = 1310 нм и $\Delta\lambda \approx 0.2$ нм получаем, что L_c = 5 мм. Число некогерентных центров рассеяния в волокне для одномодового лазера равно отношению полуширины импульса света в волокне $\tau\frac{v_r}{2}$ к длине когерентности L_c излучения лазера. Для многомодового FP лазера, излучающего на m продольных модах, число таких центров будет в m раз больше: $N = \frac{m\tau v_r}{2L_c}$. При m = 10, $\frac{v_r}{2}$ = 0.1 м/нс и L_c = 5 мм получаем: $N \approx 2000$. При относительной флуктуации мощности порядка $\frac{1}{\sqrt{N}}$ величина когерентных шумов по шкале рефлектометра будет равна: $\Delta B = 5\log\left(\frac{P_c + P_ш}{P_c}\right) = 5\log\left(1 + \frac{1}{\sqrt{N}}\right) = \frac{2}{\sqrt{N}}$. Для N = 2000 получаем, что $\Delta B \cong 0.1$ дБ.

Рассмотрим теперь шумы, возникающие из-за поляризационной анизотропии волокна и ответвителя. В OTDR обычно используется сплавные волоконные ответвители с коэффициентом деления 0.5 (3 дБ). При изготовлении ответвителя берутся два волокна. Участок волокон длиной несколько миллиметров разогревается в пламени кислородно-водородной горелки или электрической дуги до температуры плавления кварцевого стекла и вытягивается. Волокна в области перетяжки сплавляются между собой так, что при этом свет частично перекачивается из одного волокна в другое (рис. 2.19).

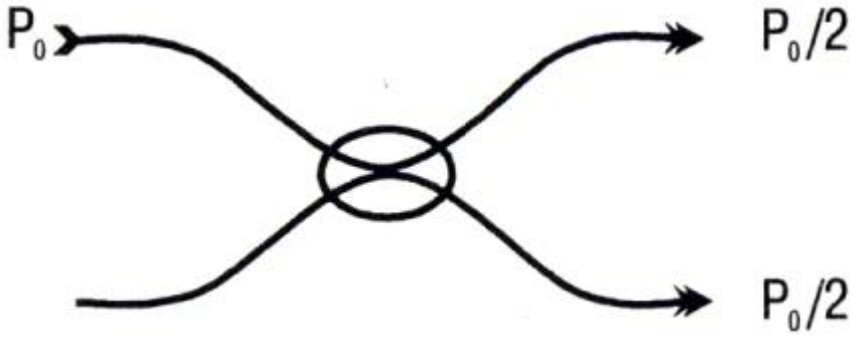


Рис. 2.19. Сварной ответвитель с коэффициентом деления 0.5 (3 дБ)

Коэффициент деления сплавного волоконного ответвителя зависит, хотя и относительно слабо, от состояния поляризации излучения. Для двух ортогональных линейных состояний поляризации излучения коэффициенты деления могут отличаться примерно на 0.05 дБ. Поэтому, направляемая ответвителем на фотоприемник мощность рассеянного в волокне излучения будет меняться при изменении состояния поляризации этого излучения. Так как излучение FP лазера линейно поляризовано, то поляризовано и рассеянное в волокне излучение. Из-за наличия в волокне двулучепреломления состояние поляризации рассеянного излучения изменяется по мере распространения света в волокне. Причем, так как двулучепреломление распределено вдоль волокна случайным образом, то и эллиптичность и азимут рассеянного излучения случайным образом зависят от расстояния до места рассеяния света в волокне. Вариации состояния поляризации рассеянного в волокне излучения приводят к появлению в рефлектограмме поляризационных шумов с амплитудой порядка нескольких сотых децибел (рис. 2.20).

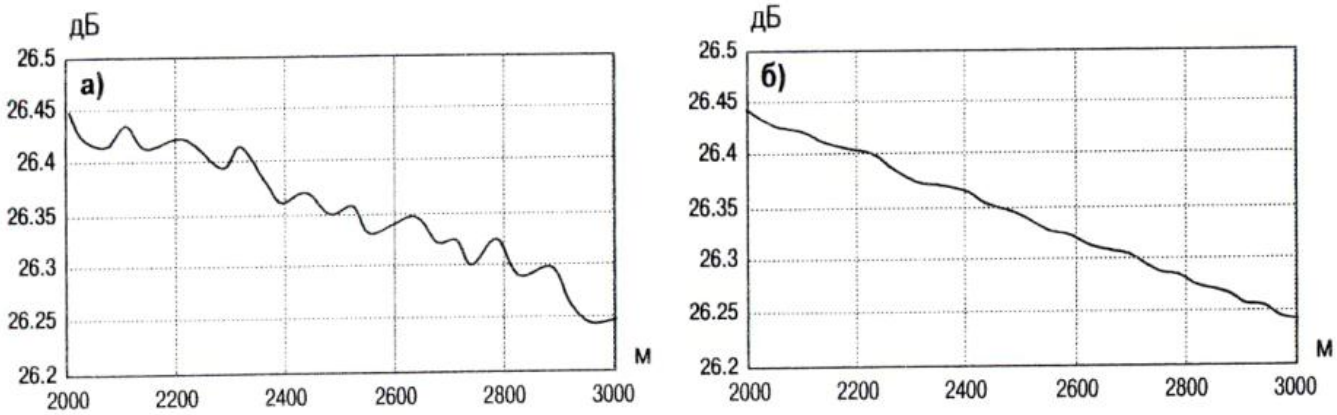


Рис. 2.20. а) Поляризационные шумы в рефлектограмме.
б) Поляризационные шумы уменьшены
за счет модуляции состояния поляризации на входе в волокно

Поляризационные шумы видны обычно на начальном участке рефлектограммы, где вклад собственных шумов фотоприемника мал. Причем, поляризационные шумы нельзя уменьшить, увеличив времени усреднения сигнала. Их можно уменьшить, установив на выходе рефлектометра устройство для модуляции состояния поляризации излучения. Это устройство позволяет многократно изменять за время измерения сигнала состояние поляризации излучения и усреднять поляризационные шумы. Как показывает опыт,

поляризационные шумы удается также уменьшить, при периодической деформации оптического шнура на выходе рефлектометра.

Раздел II.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

§ 6. Мертвые зоны для событий

Ширина мертвой зоны для событий (EDZ - event dead zone) определяется как минимально разрешимое расстояние между двумя неоднородностями. Мертвые зоны для событий подразделяются на мертвые зоны для отражающей и для неотражающей неоднородности (рис. 2.21). В спецификациях на рефлектометр обычно указывают только ширину мертвой зоны для отражающей неоднородности (мертвой зоны по отражению).

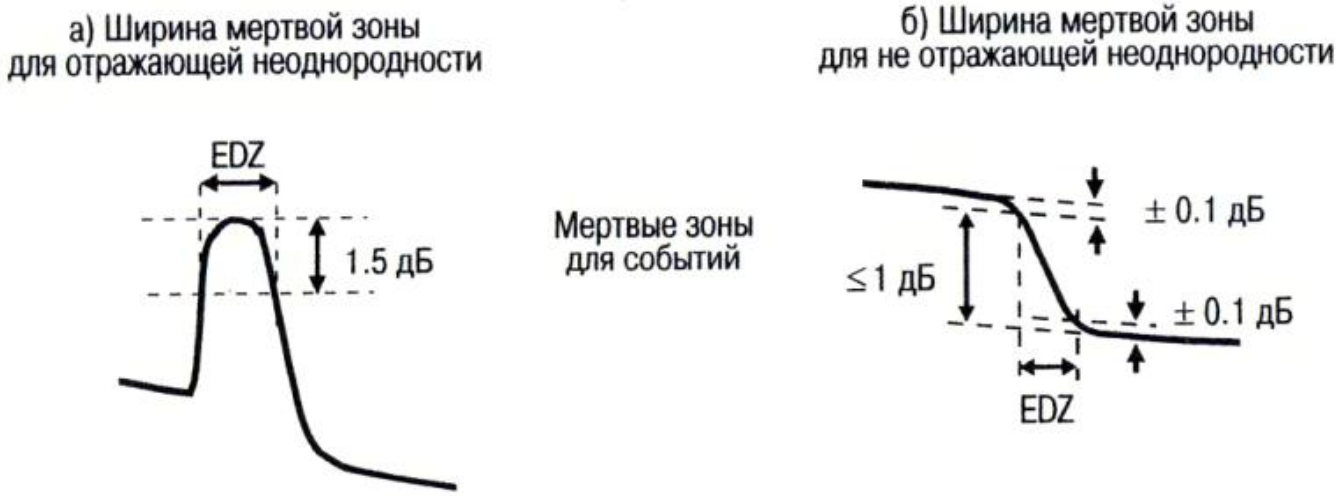


Рис. 2.21. Мертвые зоны для событий (EDZ - event dead zone).

Ширину мертвой зоны по отражению полагают равной ширине всплеска на рефлектограмме (ширине импульса света (на дисплее)) по половинному уровню (FWHM - full-width at half-maximum). По шкале рефлетометра этот уровень находится на 1.5 дБ ниже вершины импульса (рис. 2.21 а). Ширину мертвой зоны для неотражающей неоднородности определяют по ширине переходного участка, наблюдаемого на рефлектограмме в месте расположения этой неоднородности (рис. 2.21 б). При этом полагают, что величина потерь в этой неоднородности <1 дБ.

Поясним, почему ширина мертвой зоны равна ширине всплеска на рефлектограмме. На рис. 2.22 изображен участок рефлектограммы с двумя одинаковыми, близко расположенными отражающими неоднородностями. Передний фронт отраженного импульса изображается там же, где находится неоднородность. Задний фронт отраженного импульса изображается дальше от начала рефлектограммы, так как он приходит на фотоприемник позже, чем передний фронт. Расстояние между передним и задним фронтом импульса равно ширине импульса на дисплее.

Рис. 2.22. Отражение импульса света от двух одинаковых неоднородностей 1 и 2 расположенных на расстоянии, равном ширине мертвой зоны

Когда расстояние между неоднородностями заметно больше ширины импульса, они легко разрешаются, так как отраженные от них импульсы не перекрываются. Чем меньше расстояние между неоднородностями, тем сильнее перекрываются отраженные от них импульсы. Когда расстояние между неоднородностями становится равным ширине импульса, отраженные импульсы перекрываются настолько сильно, что сливаются в один импульс с небольшим провалом на вершине. При наличии такого провала оператор считает, что отражение происходит от двух неоднородностей. Этот провал не различим, когда расстояние между этими неоднородностями меньше ширины мертвой зоны, когда коэффициенты отражения от неоднородностей не равны друг другу, а также, когда рефлектограмма зашумлена. Ширина и форма импульса на дисплее зависит не только от длительности импульсов света τ, испускаемых лазерным диодом, но и от ширины полосы фотоприемника Δf. Результаты расчетов при $\Delta f = 30$ МГц и коэффициенте отражения от неоднородности $R = -35$ дБ представлены на рис. 2.23.

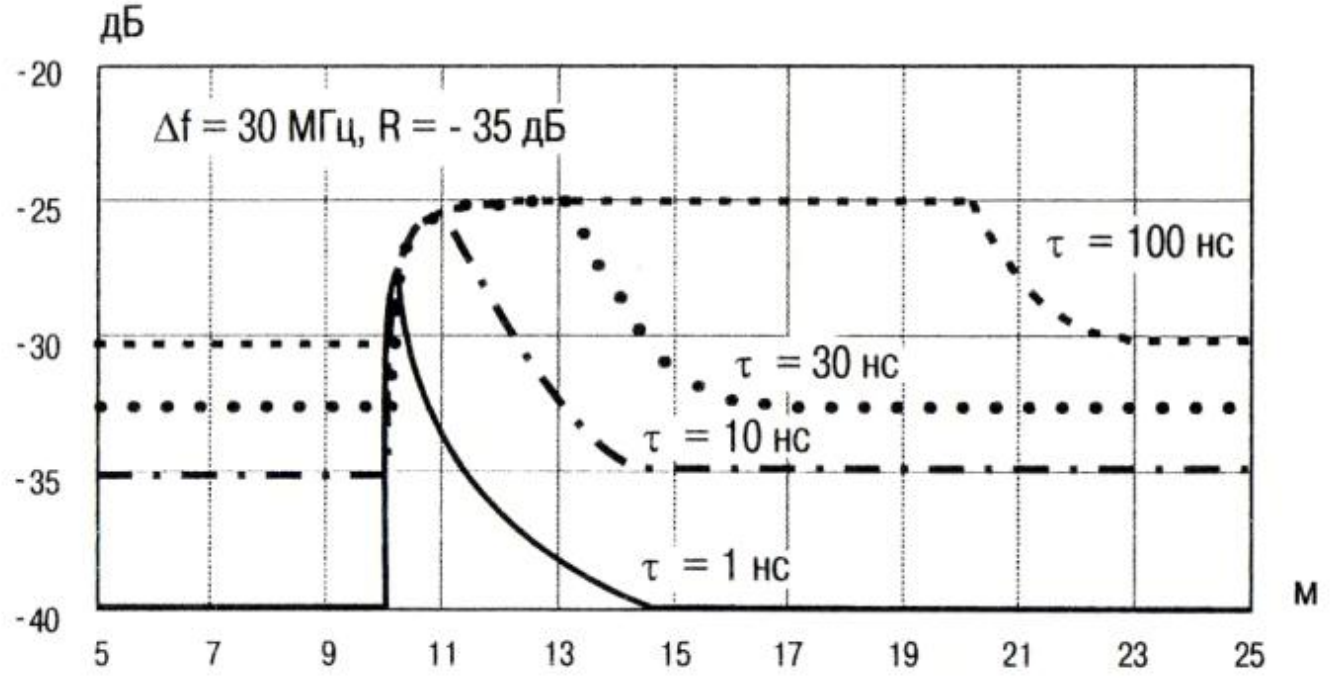


Рис 2.23. Изменение ширины и формы импульсов при изменении их длительности

Как видно из рис. 2.23, когда длительность импульсов τ больше времени установления отклика ($\frac{0,35}{\Delta f} \cong 10$ нс), форма импульса близка к прямоугольной. В этом случае ширина импульса однозначно определяется длительностью импульса и примерно равна $\tau \frac{v_r}{2}$ (например, ~10 м при $\tau = 100$ нс), где $v_г = 2\times10^5$ км/с = 0.2 м/нс – групповая

скорость света в волокне. Когда длительность импульса меньше времени установления отклика, ширина импульса ограничивается шириной полосы фотоприемника. Например, при τ = 1 нс ширина импульса (~ 1 м) получается на порядок больше, чем это должно быть, если бы она определялась длительностью импульса ($\tau \frac{v_r}{2}$ = 1 нс × 0.1 м/нс = 0.1 м). Длительности импульсов на входе τ и на выходе фотоприемника Δt связаны между собой соотношением: $\Delta t = \sqrt{\tau^2 + \left(\frac{0.35}{\Delta f}\right)^2}$. Отсюда получаем выражение для ширины импульса: $u = \Delta t \cdot \frac{v_r}{2} = \sqrt{\tau^2 + \left(\frac{0.35}{\Delta f}\right)^2} \cdot \frac{v_r}{2}$. Эта зависимость изображена на рис. 2.24.

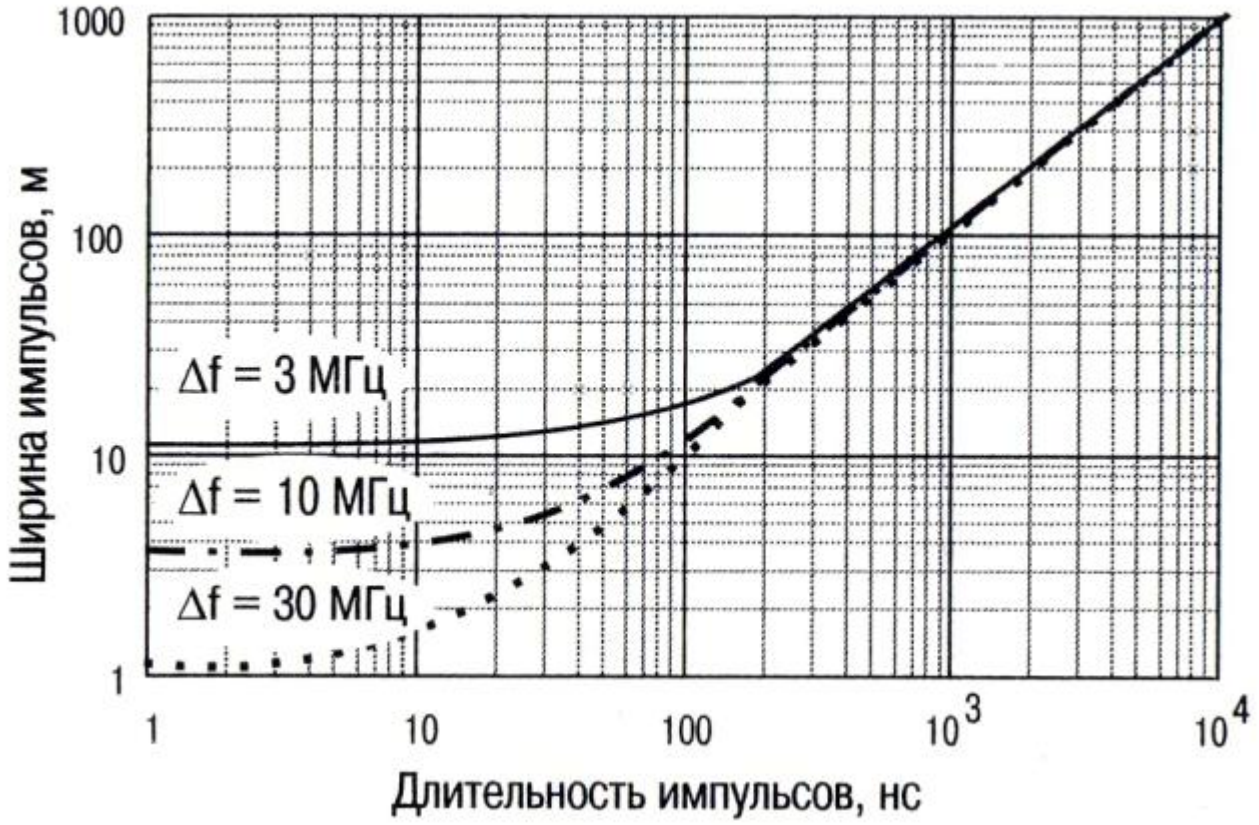


Рис 2.24. Зависимость ширины импульсов на дисплее от длительности импульсов света τ, испускаемых лазерным диодом и ширины полосы фотоприемника Δf.

Как видно из рис. 2.24, при τ > 300 нс ширина импульса пропорциональна τ: u = τ × 0.1 м/нс. При τ меньше 10 нс ширина импульса u не зависит от τ и определяется шириной полосы фотоприемника Δf. В стандартном режиме (Δf ~ 10 МГц) и τ < 10 нс ширина импульса порядка 2.5 м. В режиме максимального разрешения (Δf ~ 30 МГц) и τ < 10 нс ширина импульса чуть больше 1 м. В режиме максимального динамического диапазона (Δf ~ 3 МГц) и τ < 10 нс ширина импульса порядка 10 м. В спецификациях на рефлектометр ширину мертвой зоны обычно приводят для самого короткого импульса и максимально широкой полосе фотоприемника (режим максимального разрешения). Например, в рефлектометре E6000C ширина мертвой зоны равна 3 м, а длительность самого короткого импульса равна 10 нс. Как видно из рис. 2.24, такая ширина мертвой зоны получается при ширине полосы фотоприемника примерно 10 МГц.

§ 7. Мертвые зоны по затуханию

Ширина мертвой зоны по затуханию (ADZ - attenuation dead zone) определяется, как минимальное расстояние после отражающего события, в пределах которого нельзя

проводить измерения потерь в волокне. Оно равно расстоянию от переднего фронта импульса до конца его заднего фронта (рис. 2.25). Конец заднего фронта импульса, в соответствии с рекомендациями Telecordia (Bellcore), определяется как точка, которая отстоит от линейного участка рефлектограммы на 0.5 дБ по вертикальной шкале (при коэффициенте отражения - 35 дБ).

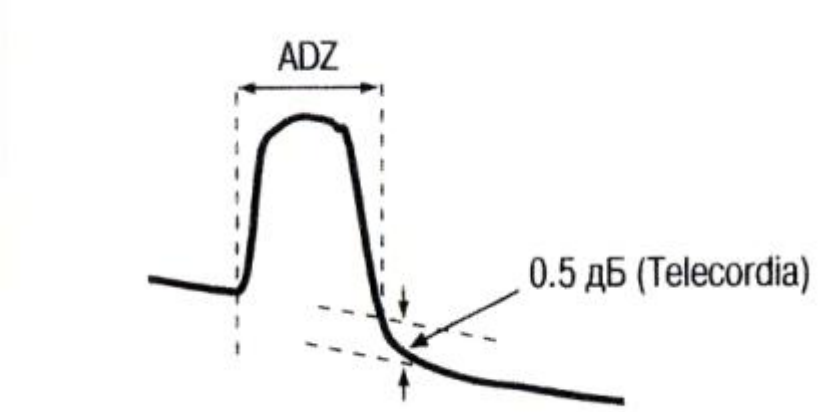


Рис. 2.25. Мертвая зона по затуханию (ADZ - attenuation dead zone).

В отсутствие насыщения ширина мертвой зоны по затуханию складывается из двух величин: $(\tau + t_x)v_r/2$, где x - длительность импульса генерируемого лазерным диодом, $t_x \times v_r/2$ – длина хвоста импульса, v_r = 0.2 м/нс – групповая скорость распространения света в волокне (рис. 2.26). Множитель 1/2 учитывает, что свет проходит через волокно дважды в прямом и обратном направлении.

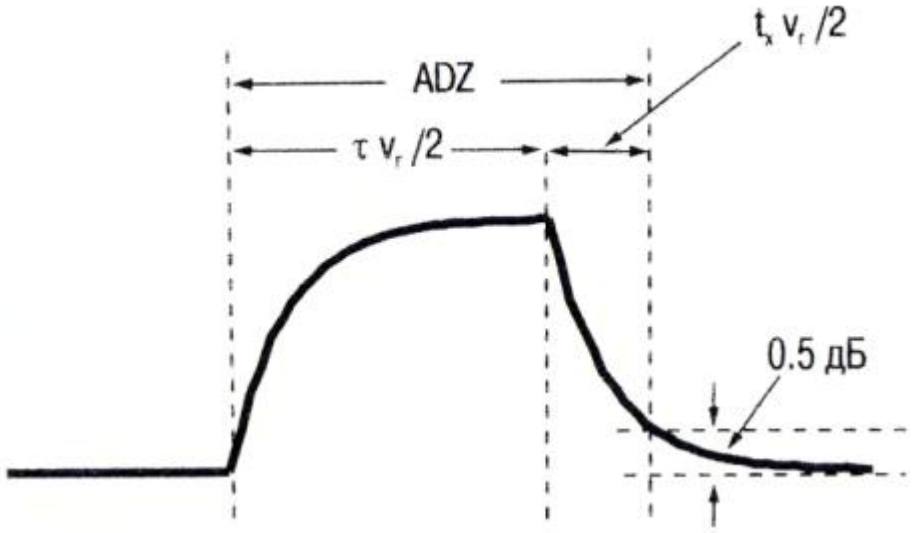


Рис. 2.26. Мертвая зона по затуханию (ADZ) возникает из-за конечной длительности импульса, генерируемого лазерным диодом, и конченой крутизны заднего фронта импульса на выходе фотоприемника

Длина хвоста импульса $t_x \times v_r/2$ зависит от того, на сколько быстро он приблизился к пьедесталу. В соответствии с рекомендациями Telecordia хвост импульса должен отстоять от пьедестала на 0.5 дБ. Математически это условие записывается в виде уравнения

$$\left(5\log R\left(1-\exp\left(-2\pi\tau\Delta f\right)\right)\cdot\exp\left(-2\pi t_x\Delta f\right)+10^{\frac{q}{5}}\right)-\frac{q}{2}=0.5 \qquad (2.5)$$

где R – коэффициент отражения от неоднородности, $\boldsymbol{q}$ = –80 дБ + 10log(τ[нс]/l[нс]) – доля света рассеянная назад в моду волокна. Результаты расчетов ширины импульса при $\boldsymbol{r}$ = 10logR = –35 дБ и –50 дБ , Δf = 30 МГц представлены на рис. 2.27.

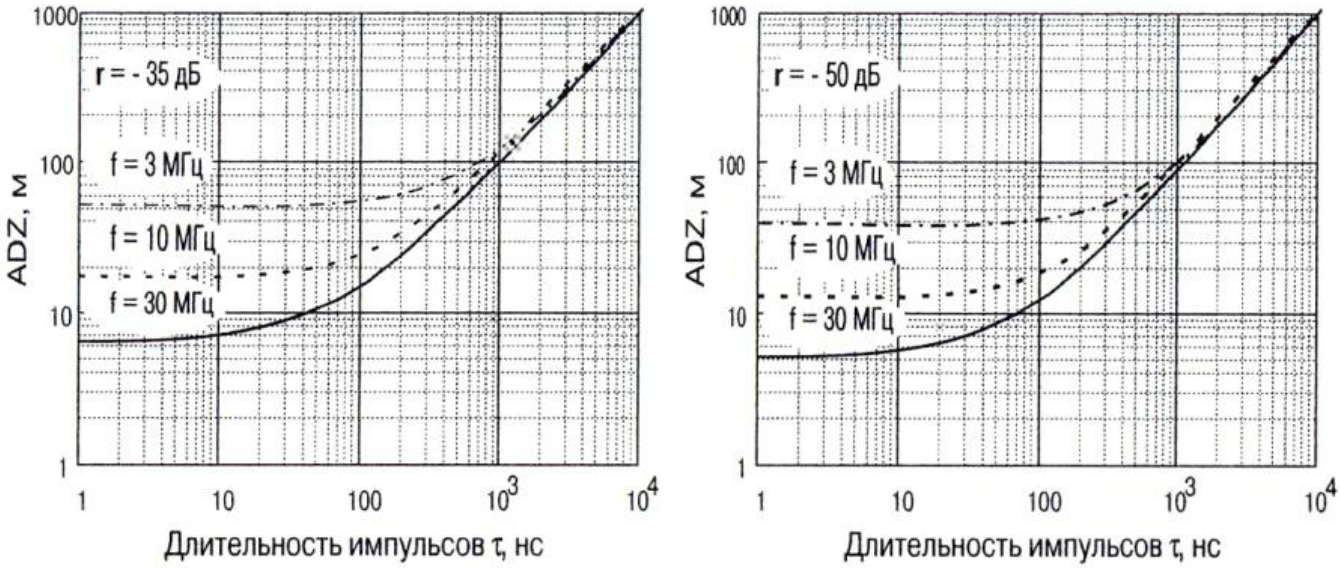


Рис. 2.27. Зависимости ширины мертвой зоны по затуханию (ADZ) (в отсутствие насыщения) от длительности импульсов и ширины полосы фотоприемника

Как видно из рис. 2.27, при $\tau > 1$ мкс ширина мертвой зоны по затуханию близка к полной ширине импульса по половинному уровню (рис. 2.24) и однозначно определяется длительностью импульса. При $\tau < 20$ нс ширина мертвой зоны по затуханию зависит от ширины полосы фотоприемника и от величины коэффициента отражения от неоднородности и примерно в 3...5 раз больше ширины импульса.

Фотоприемник, как правило, насыщается при попадании на него мощного излучения, отраженного от оптического разъема или торца волокна. При большой мощности лазерного диода к насыщению фотоприемника может привести даже релеевское рассеяние излучения в начале волокна. Эффект насыщения проявляется в виде ограничения амплитуды импульса (clipping level) и увеличения ширины верхушки импульса за счет времени, необходимого для освобождения p-n перехода от накопленного заряда (рис. 2.28).

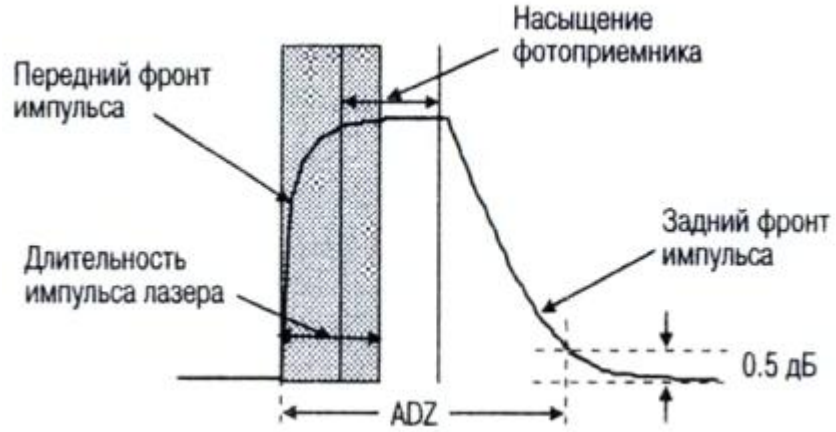


Рис. 2.28. Увеличение ширины мертвой зоны по затуханию (ADZ) при насыщении фотоприемника

3

ПРИМЕНЕНИЯ OTDR

Оптические рефлектометры применяются в телекоммуникациях в соответствии с Rec. G.651 и G.652. Измерения параметров линии с помощью OTDR обычно выполняются в автоматическом режиме, что позволяет выполнить измерения наиболее быстрым и удобным способом, не требует от оператора специальных навыков и обеспечивает получение всех необходимых данных. Однако для интерпретации событий, наблюдаемых на рефлектограмме, и многочисленных данных, выводимых на дисплей, необходимо иметь представление об основных методиках измерений и алгоритмах обработки рефлектограмм.

Так, например, потери в волокнах находятся не прямым методом (по изменению прошедшей мощности), а косвенным способом по изменению рассеянной в волокне мощности света. Из-за нерегулярности коэффициента релеевского рассеяния света в волокне такой косвенный способ измерения потерь приводит к появлению систематической погрешности. Для того, чтобы устранить эту погрешность, приходится измерять рефлектограммы с обеих сторон волокна.

В этой главе рассмотрены основные методики измерений, проводимых с помощью OTDR. Они весьма разнообразны и специфичны и включают в себя измерение расстояний, потерь и коэффициентов отражений.

Раздел I.

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ

§ 1. Методика измерения длины волокна

Одной из важнейших задач, решаемых с помощью OTDR, является измерение расстояний до неоднородностей. Это расстояние определяется по времени запаздывания импульсов, отразившихся от неоднородности и вернувшихся обратно в рефлектометр. Пересчет времени в расстояние осуществляется автоматически с помощью формулы

$$L = \frac{cT}{2n_{\Gamma}}, \tag{3.1}$$

где c/n_{Γ} – групповая скорость распространения света в волокне, c – скорость света в вакууме, n_{Γ} – групповой показатель преломления волокна. Множитель 1/2 учитывает то, что импульс света проходит участок длиной L дважды – в прямом и обратном направлении. При оценках обычно используют приближенные значения c = 3105 км/с и n_{Γ} = 1.5. Тогда коэффициент пересчета времени в расстояние получается равным 0.1 км/мкс = 0.1 м/нс.

В результате такого пересчета рефлектограмма представляется на дисплее OTDR как функция длины волокна. При этом точность измерения расстояния с помощью рефлектометра ограничивается теми же факторами, что и при классических способах измерения расстояния (например, с помощью линейки). А именно, точностью определения положения начала и конца отсчета и точностью калибровки шкалы прибора.

Для OTDR характерно то, что точность измерения расстояния практически не зависит от длительности (τ) зондирующих импульсов, которая может меняться в широких пределах (от 2 нс до 20 мкс). Обусловлено это тем, что положение неоднородности на рефлектограмме определяется по переднему фронту импульса, как это показано на рис. 3.1.

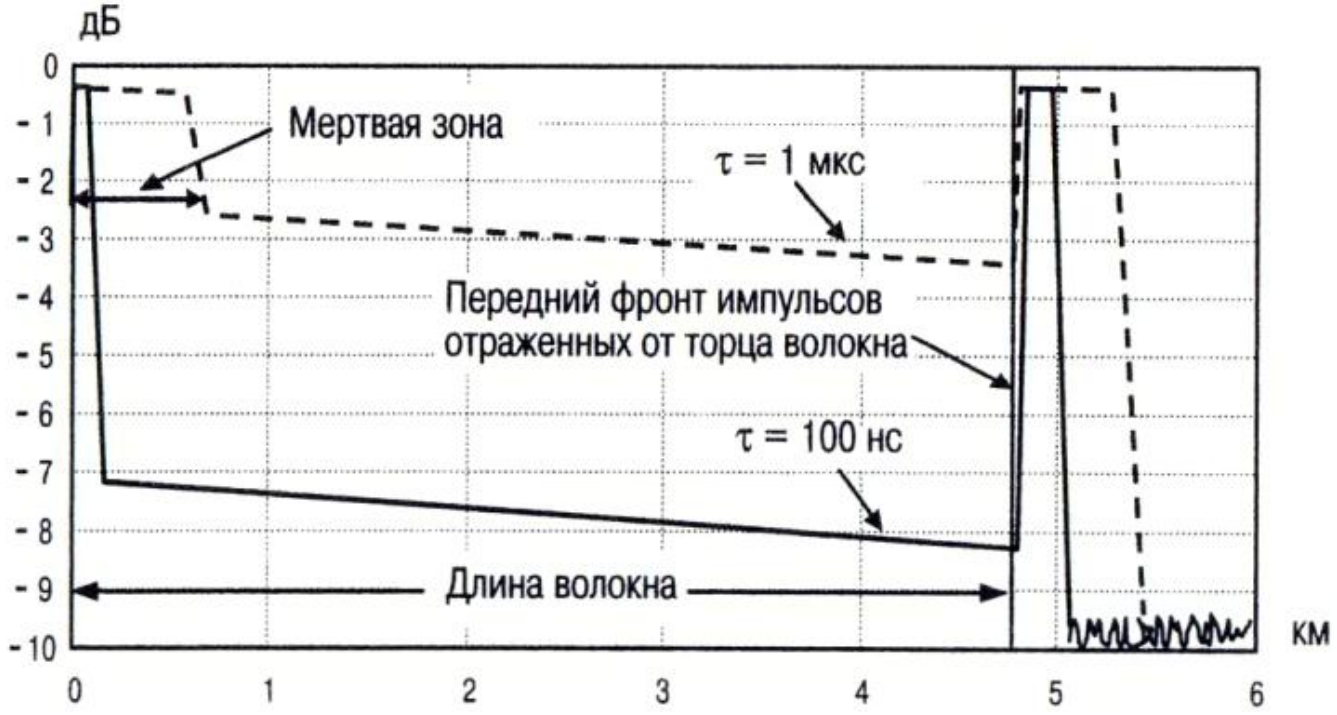


Рис. 3.1. Измерение длины волокна по сигналу отражения от конца волокна

На рис. 3.1 представлены рефлектограммы отрезка волокна длиной около 5 км с погонными потерями порядка 0.2 дБ/км на $\lambda = 1550$ нм. Рефлектограммы измерены при двух значениях длительности импульса 100 нс (сплошная линия) и 1 мкс (пунктирная линия). Рефлектограммы представляют собой прямые линии (с углом наклона ~ 0.2 дБ/км) и с всплесками сигнала в начале и в конце линии. Эти всплески сигнала вызваны отражением импульсов света от оптического разъема рефлектометра и от торца волокна и представляют собой по существу осциллограммы отраженных импульсов. Причем передний фронт отраженных импульсов отображается ближе к началу рефлектограммы, так как он приходит на фотоприемник раньше, чем его задний фронт.

Длина волокна находится по расстоянию между передними фронтами импульсов, отраженных от оптического разъема рефлектометра и от заднего торца волокна. Это расстояние, как видно из рис. 3.1, не зависит от ширины импульса. Точность, с которой определяется положение начала и конца волокна тем выше, чем больше крутизна переднего фронта импульса.

Длительность импульсов определяет величину сигнала обратного релеевского рассеяния света в волокне и ширину мертвой зоны в начале рефлектограммы. При большой длительности импульса (1 мкс) сигнал обратного релеевского рассеяния заметно превосходит уровень шумов в конце рефлектограммы, но при этом мертвая зона делает недоступным для измерения большой участок в начале волокна (~ 0.5 км). При уменьшении длительности импульса до 100 нс ширина мертвой зоны уменьшается примерно в 10 раз. При этом уровень сигнала обратного релеевского рассеяния уменьшается на 5 дБ, и вклад шумов может уже стать заметным.

§ 2. Инструментальные ошибки

Инструментальные ошибки в измерении длины волокна по рефлектограмме складываются из ошибки в определении начала волокна (смещение нуля), ошибки в калибровке горизонтальной шкалы рефлектометра и ошибки в определении положения конца волокна. Ошибка в определении положения конца волокна обусловлена конечной шириной интервала между измеряемыми точками (ценой деления) и неточностью фиксации положения переднего фронта импульса, отраженного от конца волокна. Смещение нуля возникает из-за ошибки в фиксации момента испускания импульса и примерно одинаково (± 1 м) для всех моделей mini-OTDR.

Точность калибровки горизонтальной шкалы рефлектометра определяется точностью, с которой измеряется ход времени в рефлектометре ($\approx 3\times10^{-5}$) и точностью, с которой специфицируется величина группового показателя преломления волокна. В большинстве случае точность, с которой специфицируется величина группового показателя преломления волокна, составляет около 3×10^{-5}. Оба эти фактора дают одинаковый вклад в результирующую ошибку, равную примерно $5\times10^{-5}\times L$, где L – длина волокна.

Инструментальная ошибка в определении положения конца волокна равна половине ширины интервала между измеряемыми точками L_0/N, где L_0 – диапазон измеряемых длин, N – число измеряемых точек (рис. 3.2). Устанавливаемый в рефлектометре диапазон измеряемых длин L_0 обычно немного превышает длину волокна. Полагая $L_0 = L$ для типичного значения N = 32 000 получаем, что эта инструментальная ошибка равна примерно $3\times10^{-5}\times L$.

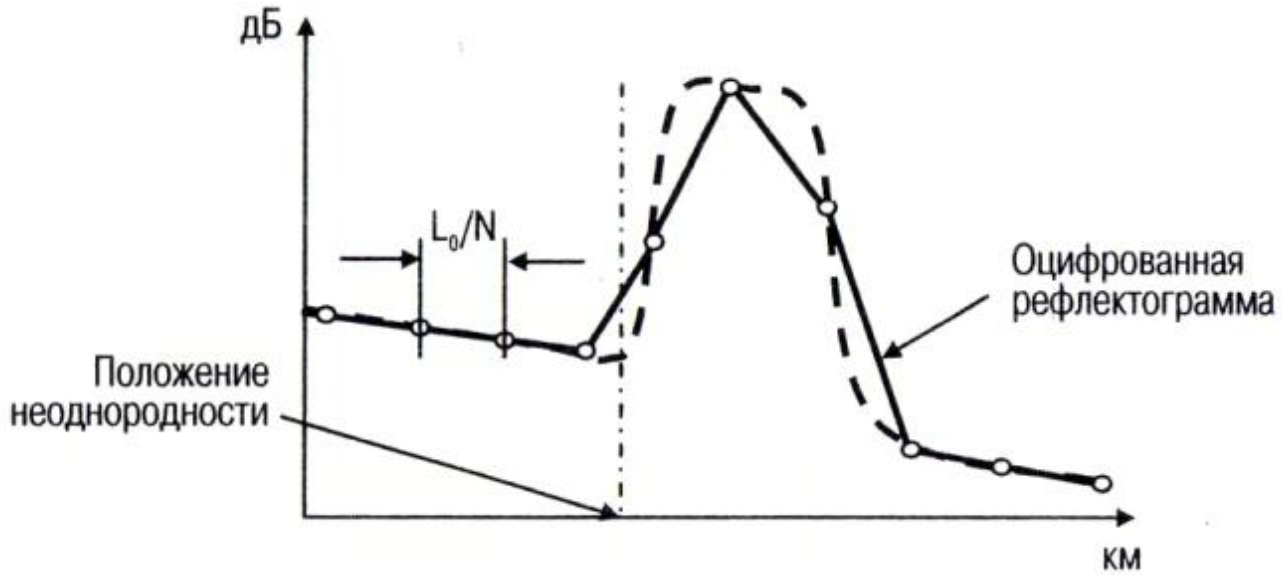


Рис. 3.2. Нахождение положения отражающей неоднородности на рефлектограмме

Все инструментальные ошибки, кроме смещения нуля (см. таблицу № 3.1), прямо пропорциональны длине волокна. Как видно из этой таблицы, при длине волокна менее 20 км результирующая инструментальная ошибка в измерении длины волокна обусловлена, в основном, смещением нуля и составляет около 1 – 2 м. При увеличении длины волокна до 200 км результирующая инструментальная ошибка увеличивается до 10 – 20 м.

Таблица № 3.1. Инструментальные ошибки при измерении длины волокна

Наименование ошибки	величина ошибки
Смещение нуля	±1м
Ошибка из-за неточности калибровки	$5\times10^{-5}\times L$
Ширина интервала между	$3\times10^{-5}\times L$

§ 3. Типичные ошибки оператора

Перед началом измерений в рефлектометре необходимо установить величину группового показателя преломления волокна и диапазон измеряемых длин. Диапазон измеряемых длин устанавливается немного больше измеряемой длины волокна. Так, чтобы в конце реф-лектограммы был виден всплеск сигнала отражения от торца волокна и шумовая дорожка, образующаяся в отсутствие сигнала обратного рассеяния света в волокне.

Если значение диапазона измеряемых длин установлено меньше длины измеряемого волокна, то в рефлектограмме появляются ложные сигналы. Они образуются потому, что рефлектометр посылает следующий импульс раньше, чем успеет вернуться предыдущий импульс. В результате в фотоприемник в одно и тоже время поступают импульсы, отраженные от разных участков волокна, как это показано на рис. 3.3.

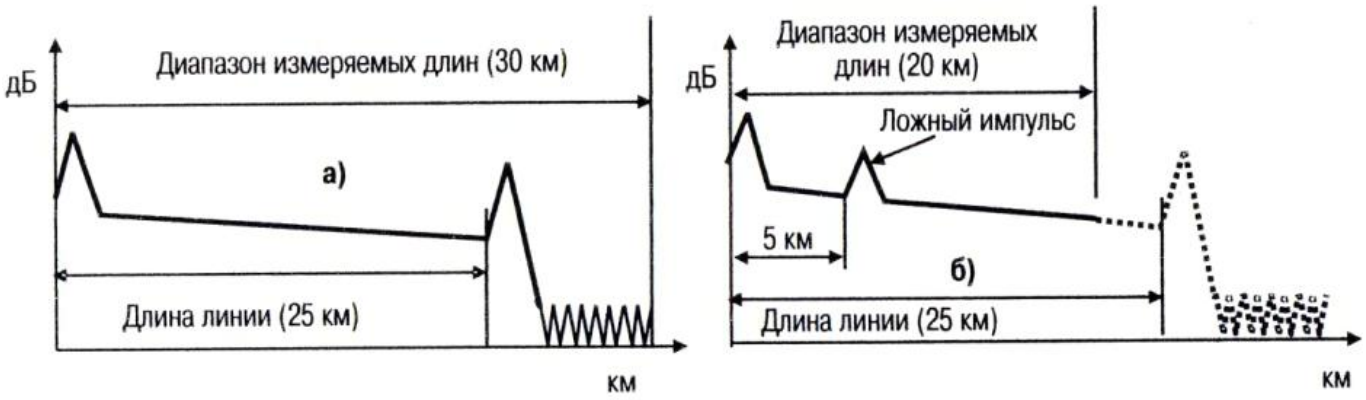


Рис. 3.3. Рефлектограммы линии при разных значениях диапазона измеряемых длин:
а) Диапазон измеряемых длин (30 км) больше длины линии (25 км)
б) Диапазон измеряемых длин (20 км) меньше длины линии (25 км)

На рис. 3.3а изображена рефлектограмма отрезка волокна длиной 25 км, полученная при правильной установке диапазона измеряемых длин (30 км, т.е. больше длины волокна). В конце рефлектограммы виден всплеск сигнала отражения от торца волокна и видна шумовая дорожка.

Оценим время, затрачиваемое импульсом света на прохождение через этот отрезок волокна (туда и обратно) и время, через которое рефлектометр посылает очередной импульс света. Учитывая, что коэффициент пересчета равен 0.1 км/мкс, получаем, что при диапазоне измеряемых длин в 30 км, рефлектометр посылает импульсы света через каждые 0.3 мс. В тоже время импульс света, отраженный от торца волокна длиной 25 км, возвращается в рефлектометр через 0.25 мс, т.е. раньше, чем рефлектометр пошлет в волокно следующий импульс.

На рис. 3.3б изображена рефлектограмма того же отрезка волокна (длиной 25 км), полученная при неправильной установке диапазона измеряемых длин (20 км, т.е. меньше длины волокна). В этом случае рефлектометр посылает в волокно импульсы света через каждые 0.2 мс. При этом импульс света, отраженный от торца волокна, возвращается в рефлектометр через 0.25 мс, то есть получается, что очередной импульс рефлектометр посылает в волокно раньше, чем вернется предыдущий импульс, отраженный от торца волокна.

В результате фотоприемник регистрирует два импульса отраженных от заднего торца волокна. При этом ложный импульс будет отображен ближе к началу рефлектограммы. Как видно из рис. 3.3б, ложный импульс появляется на расстоянии 5 км, равном разности между длиной линии (25 км) и величиной (неправильно установленного) диапазона измеряемых длин (20 км).

Ложный импульс можно обнаружить не только по его местоположению, но и по тому, что у него нет ступеньки, какая обычно бывает из-за потерь в неоднородности. Кроме того, при неправильной установке диапазона измеряемых длин в конце рефлектограммы не будет виден всплеск сигнала отражения от торца волокна и не будет видна шумовая дорожка, образующаяся в отсутствие сигнала обратного рассеяния света в волокне.

Для того, чтобы представить рефлектограмму как функцию длины волокна, необходимо знать величину группового показателя преломления волокна или, иначе говоря, скорость распространения импульса света в волокне. Импульс света можно рассматривать как совокупность близких по частоте монохроматических волн. В вакууме все эти монохроматические волны распространяются с одной и той же фазовой скоростью c – скоростью света в вакууме. С этой же скоростью будет распространяться и импульс света.

При распространении импульса света в волокне дело обстоит сложнее. Показатель преломления волокна зависит от длины волны, причем по двум причинам. Во-первых, из-за того, что показатели преломления сердцевины и кварцевой оболочки волокна зависят от длины волны (материальная дисперсия). Во-вторых, потому, что волна распространяется

частично в сердцевине и частично в оболочке и показатель преломления волокна принимает некое среднее значение между величиной показателя преломления сердцевины и кварцевой оболочки. При изменении длины волны изменяется глубина проникновения поля волны в кварцевую оболочку и, соответственно, величина эффективного показателя преломления (волноводная дисперсия).

В среде с дисперсией каждая из монохроматических волн, на которые разлагается импульс, распространяется со своей фазовой скоростью $c/n(\lambda)$, где $n(\lambda)$ - показатель преломления среды (фазовый). В результате оказывается, что импульс света не только деформируется, но весь он (например, его вершина) перемещается со скоростью (групповой), отличающейся от фазовой скорости любой его монохроматической составляющей. По аналогии с фазовой скоростью (c/n) скорость перемещения импульса v (групповую скорость) принято характеризовать групповым показателем преломления: $v = c/n_\Gamma$. Групповой показатель n_Γ связан с фазовым показателем преломления n соотношением: $n_\Gamma = n - \lambda\times(dn/d\lambda)$. В отсутствие дисперсии ($dn/d\lambda = 0$), как легко видеть, $n_\Gamma = n$ и скорость (групповая), с которой распространяется импульс, совпадает с фазовой скоростью.

Степень легирования сердцевины и геометрические параметры SM волокон у разных компаний производителей волокна могут немного различаться. Как видно из таблицы 3.2, типичные значения групповых показателей преломления SM волокон разных производителей отличаются друг от друга в третьем знаке после запятой (± 0.2 %). При длине волокна 30 км ошибка в установке величины группового показателя преломления в 0.2 % приводит к ошибке в определении длины волокна в 60 м.

Таблица 3.2. Типичные значения групповых показателей преломления для стандартных одномодовых (SM) волокон

Компания производитель		Alcatel	Corning	Hitachi	OFS	Pirelli	Samsung
Групповой показатель преломления	λ = 1310 нм	1,4640	1,4677	1,466	1,466	1,467	1,4690
	λ = 1550 нм	1,4645	1,4682	1,467	1,467	1,468	1,4695

Величина группового показателя волокна обычно приводится в спецификациях на оптический кабель, но иногда это не делается. В этом случае в рефлектометре можно установить среднее значение группового показателя преломления для SM волокон: $n_\Gamma = 1.467$. Как видно из таблицы № 3.2, практически для всех волокон типичное значение группового показателя преломления отличается от этого среднего на величину ~ 0.2 %.

В некоторых задачах необходимо знать с хорошей точностью разность групповых показателей преломления на разных длинах волн. Например, когда при поиске сильно изогнутых участков волокон надо сравнить рефлектограммы, измеренных на разных длинах волн. Для того, чтобы проводить такое сравнение, необходимо чтобы расстояния межу неоднородностями в этих рефлектограммах были одинаковыми. Наличие изгиба в волокне удается идентифицировать потому, что потери, вносимые при изгибе волокна, сильно зависит от длины волны излучения.

Из таблицы 3.2 видно, что групповые показатели преломления SM волокон на длинах волн 1310 нм и 1550 нм различаются в четвертом знаке после запятой. Эту небольшую прибавку можно рассчитать с помощью коэффициента дисперсии, величина которой для SM волокон специфицирована. Коэффициент дисперсии волокна выражается через производную от группового показателя преломления соотношением: $D(\lambda) = \frac{1}{c}\cdot\frac{dn_\Gamma}{d\lambda}$. С другой стороны, зависимость коэффициента дисперсии SM волокон от длины волны в диапазоне длин волн 1200 нм...1600 нм определяется выражением $D(\lambda) = \frac{S_0\lambda}{4}\left(1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^4\right)$, где S_0 = 0.09 пс/(нм²×км) – коэффициент наклона дисперсии на длине волны нулевой дисперсии $\lambda_0 = 1310$ нм. Отсюда нетрудно рассчитать разность групповых показателей

преломления для двух длин волн: $n_\Gamma(\lambda)-n_\Gamma(\lambda_0)=\frac{cS_0\lambda^2}{8}\left(1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right)^2$. Зависимость разности $n_\Gamma(\lambda)-n_\Gamma(\lambda_0)$ от длины волны изображена на рис. 3.4.

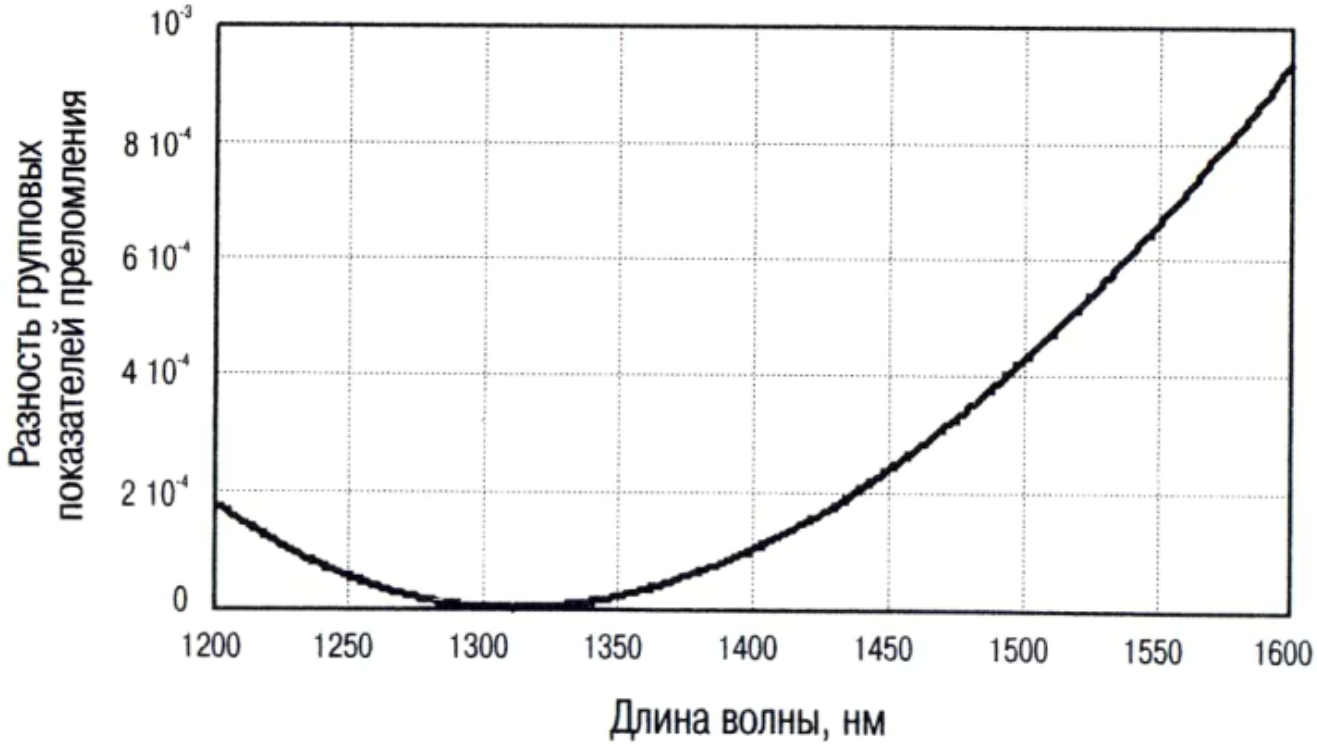


Рис. 3.4. Зависимость разности групповых показателей преломления $n_\Gamma(\lambda) - n_\Gamma(\lambda_0)$ от длины волны для SM волокон.

Для длин волн 1550 нм и 1310 нм разность групповых показателей преломления, как видно из рис. 3.4, равна 6×10^{-4}. Таким образом, если значение группового показателя преломления для волокна неизвестно, то на λ_0 = 1310 нм следует установить n_Γ = 1.4670, а на λ = 1550 нм, соответственно, n_Γ = 1.4676.

Оценим ошибку в измерении расстояния, возникающую из-за неточности величины группового показателя преломления волокна, указанной в спецификации на волокно. Обычно в спецификации на волокно в значении группового показателя преломления указываются четыре знака после запятой. Например, для волокна компании Corning в таблице 3.2 приведено значение n_Γ = 1.4682 (на λ = 1550 нм). Такая запись означает, что величина n_Γ измерена производителем волокна с точностью $\pm5\times10^{-5}$. При этом ошибка в измерении длины будет равна $\pm5\times10^{-5}\times$L. Т.е. она будет примерно такой же, как и инструментальная ошибка рефлектометра.

Если же величина группового показателя преломления неизвестна и в рефлектометре установлено среднее значение группового показателя преломления на этой длины волны, например, n_Γ = 1.4676 на λ = 1550 нм, то ошибка в измерении расстояния будет, естественно, больше. Как видно из таблицы 3.2, практически для всех волокон типичное значение группового показателя преломления отличается от этого среднего на величину ~0.2 %. Это значит, что ошибка в определении расстояния будет порядка $\pm 10^{-3}\times$L.

§ 4. Методические ошибки

Методические ошибки в определении расстояния до неоднородности в линии передачи возникают из-за того, что положение неоднородности на рефлектограмме получается разным для отражающей и не отражающей (поглощающей) неоднородности. Эти ошибки влияют на точность определения места повреждения волокна. Происходит это потому, что при обрыве волокна угол наклона торца волокна может получиться

практически любым и коэффициент отражения от торца волокна может меняться в широких пределах практически от нуля до френелевского коэффициента отражения.

Величина ошибки в определении положения конца волокна зависит от крутизны фронта импульса, коэффициента отражения от неоднородности и коэффициента обратного релеевского рассеяния света в волокне. При хорошем сколе торца волокна в конце рефлектограммы наблюдается всплеск сигнала, обусловленный отражением (кривая А, рис. 3.5). Амплитуда этого всплеска пропорциональна мощности оптического импульса, а крутизна начала всплеска пропорциональна крутизне переднего фронта импульса.

Положение конца волокна (L_A) определяется по моменту времени, когда этот всплеск достигнет верхнего порогового уровня, пересечение которого означает обнаружение отражающей неоднородности. Чем круче начало всплеска сигнала (чем больше крутизна фронта импульса), тем точнее определяется положение такой неоднородности. Минимальная ошибка, с которой можно определить положение отражающей неоднородности, примерно равно половине ширины интервала между измеряемыми точками.

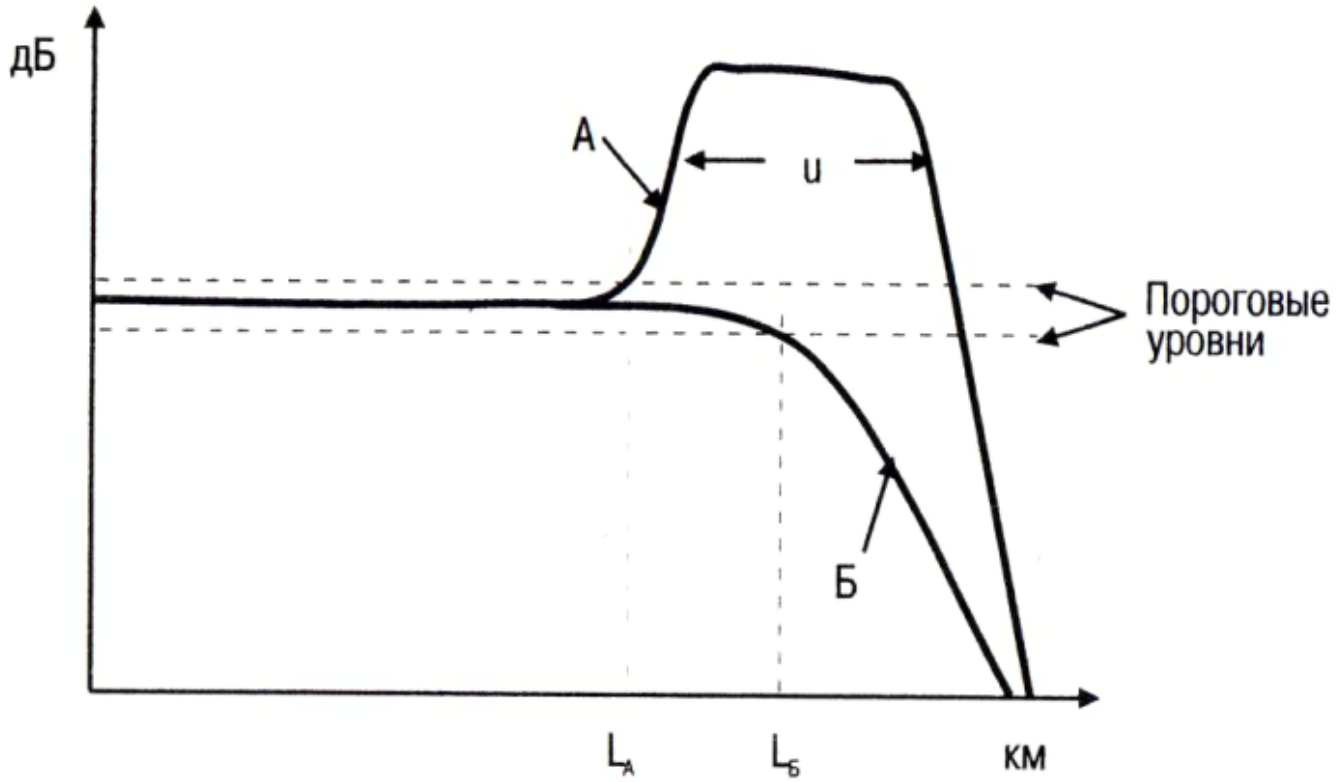


Рис. 3.5. Нахождение положения конца волокна в рефлектограмме при разных значениях коэффициенте отражения от торца (u - ширина импульса), (А) Френелевский коэффициент отражения от торца волокна, (Б) Конец волокна погружен в иммерсию

Если же отражение отсутствует, например, из-за того, что конец волокна погружен в иммерсию или на конце волокна создана петелька с большими потерями, то в конце рефлектограммы наблюдается уменьшение сигнала (кривая Б). В этом случае положение конца волокна ($L_Б$) определяется по моменту, когда сигнал достигнет нижнего порогового уровня.

При прохождении импульса через отражающую неоднородность скорость нарастания сигнала определяется крутизной переднего фронта импульса (кривая А). Соответственно, пороговый уровень достигается, когда через эту неоднородность пройдет часть переднего фронта импульса. При прохождении импульса через не отражающую неоднородность (кривая Б) сигнал начнет заметно уменьшаться только после того, как через неё пройдет не только весь передний фронт импульса, но и некоторая доля самого импульса.

В результате оказывается, что измеренное значение длины волокна зависит от качества скола торца волокна и может превысить его истинное значение на несколько десятков метров. Эта методическая ошибка может существенно повлиять на точность определения места повреждения волокна в линии передачи. Поэтому целесообразно рассмотреть более подробно характерные типы повреждений волокна.

Волокна в оптическом кабеле разрушаются, в основном, под действием натяжения, возникающего при укладке волокон в кабель, инсталляции кабеля в линию передачи и в процессе эксплуатации этой линии. Они могут быть также разрушены при сильных ударах по кабелю или его сильных изгибах. Избыточное натяжение волокна приводит к появлению трещины в кварцевой сердцевине и оболочке волокна. Однако волокно обычно полностью не разрывается потому, что после раскалывания кварцевой оболочки обе ее половинки продолжают удерживаться пластиковым (акрилатным) покрытием волокна (рис 3.6).

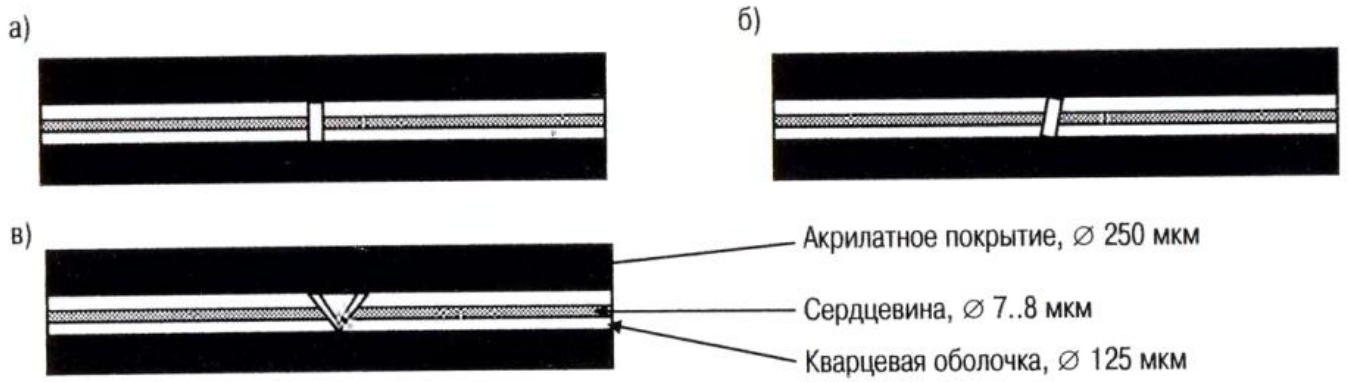


Рис 3.6. Типичный вид трещин, образующихся при растяжении волокна
а) Хорошо отражающая трещина с двумя плоскими поверхностями
б) Плохо отражающая трещина с двумя плоскими поверхностями
в) Плохо отражающая трещина, с четырьмя отражающими поверхностями

Плоские торцевые поверхности образуются на ослабленном участке волокна там, где на поверхности уже имеется микроскопическая трещина. Тогда для разрыва волокна требуется относительно небольшое натяжение. Под действием этого натяжения трещина начинает увеличиваться в направлении приблизительно перпендикулярном оси волокна. При этом вначале, как показано на рис. 3.7, образуется плоская зеркально гладкая поверхность (её максимальный диаметр порядка 90 мкм), далее появляются так называемая зона тумана и перьевая зона. Поверхность сердцевины волокна при этом получится плоской и зеркально гладкой.

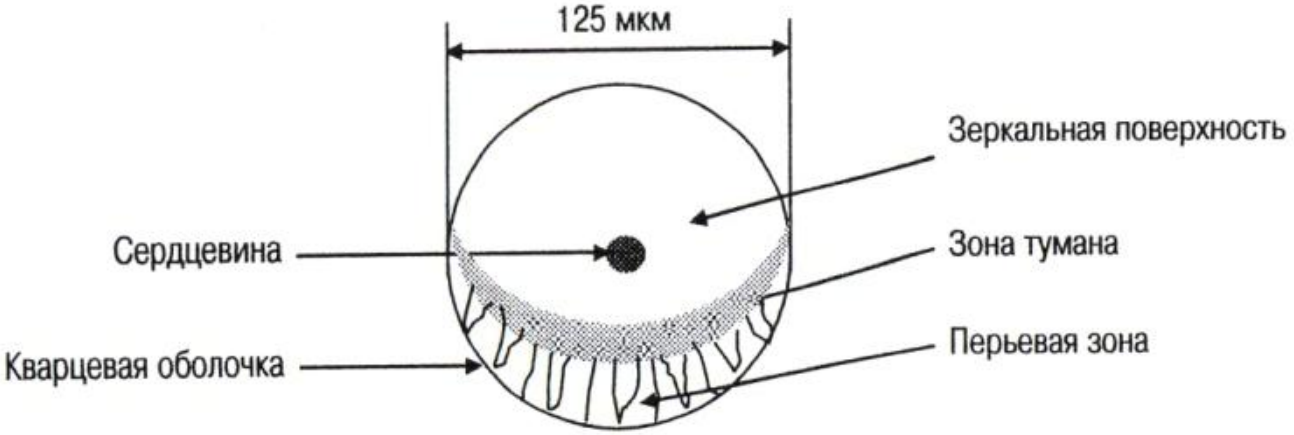


Рис 3.7 Плоская поверхность торца волокна с зоной тумана и перьевой зоной

Если же на поверхности волокна нет заметных дефектов, то для его разрушения требуется приложить большее напряжение. При большом натяжении процесс разрушения выглядит иначе. В этом случае необходимо учитывать, что в процессе роста трещины энергия натяжения преобразуется в кинетическую энергию. Возникающий при большом

натяжении волокна избыток кинетической энергии трещины приводит к созданию новых трещин так, что плоской поверхности практически не образуется, а волокно распадается на три или более куска с зазубренными краями (рис. 3.6 в).

Коэффициент отражения света от трещин зависит от качества образующих её торцевых поверхностей и расстояния между ними. Если торцевая поверхность оптически плоская, и нормаль к ней параллельна оси волокна (рис. 3.6 а), то коэффициент отражения от такой поверхности близок к френелевскому (~3.5 %). Коэффициент отражения от двух таких поверхностей зависит от расстояния между ними и может меняться в пределах от 0 до 14%.

При увеличении угла наклона q между нормалью к торцевой поверхности и осью волокна коэффициент отражения от этой поверхности (обратно в моду волокна) быстро уменьшается. При угле больше 4° такая трещина, как видно из таблицы 3.3, уже представляет собой практически неотражающую неоднородность.

Таблица 3.3. Зависимость коэффициента отражения от угла между осью волокна и нормалью к поверхности торца волокна

Угол между осью волокна и нормалью к плоскости торца, град	0	1	2	3	4	5
Коэффициент отражения, %	3.50	2.55	0.98	0.20	0.02	1.3×10^{-3}

Для того, чтобы волокно скололось под углом меньше 4°, необходимо, чтобы насечка на поверхности волокна, с которой начинается рост трещины, была с хорошей точностью ориентирована перпендикулярно оси волокна. Такая насечка может быть создана с помощью высококачественного скалывателя (типичный угол скола < 0.5...1°). Вероятность создать её случайным образом мала. Так, например, при разрушении волокна в линии, среднее значение коэффициента отражения от скола получается всего лишь около 0.1 %. Часть таких сколов получается настолько плохими, что их нельзя обнаружить с помощью идентификаторов дефектов (fault locators), регистрирующих только отраженное излучение.

Неотражающие сколы волокна можно обнаружить с помощью рефлектометра, так как они неизбежно приводят к появлению дополнительных потерь. Однако в этом случае возникает методическая ошибка в определении положения места повреждения волокна. Эту ошибку можно скорректировать, если предварительно измерить её зависимость от величины коэффициента отражения и ввести соответствующую поправку в измеренное значение длины волокна.

§ 5. Разрешающая способность при измерении длины

Кроме рефлектограммы на дисплей рефлектометра выводится таблица, содержащая данные об основных событиях в линии, в том числе и расстояния до всех неоднородностей. Характерно, что расстояния до неоднородностей указываются с точностью до шестого, а иногда и до седьмого знака. Например, в таблице 3.4 полная длина линии указана с точностью до шестого знака: 68.1328 км.

Число знаков, с которым прибор показывает измеренное значение, характеризует прецизионность отсчета, т.е. насколько точно можно произвести отсчет. Точность же измерения длины волокна заметно меньше. Она зависит не только от точностных характеристик рефлектометра, но от величины коэффициента отражения от неоднородности, точности, с которой установлен групповой показатель преломления волокна, и т.д.

При большом числе знаков в отсчете естественно возникает вопрос, сколько же знаков являются на самом деле значимыми. Проще всего это можно определить, скалывая последовательно небольшие отрезки волокна (рис. 3.8), и наблюдая, как при этом изменяются показания рефлектометра. По существу, таким способом определяется разрешающая способность рефлектометра при измерении длины волокна. Как известно разрешающая способность – это наименьший интервал изменения измеряемой величины, который все ещё вызывает изменение результатов измерений.

Рис. 3.8. Схема определения разрешающей способности рефлектометра при измерении длины волокна

В таблице 3.4 представлены результаты измерений длины SM волокна при многократном уменьшении его длины на один метр. Измерения проводились рефлектометром E6000C на длине волны 1310 нм при длительности импульса 3 мкс. Число измеряемых точек в E6000C равно 16 000, что соответствует, при диапазоне измерений 80 км, интервалу между точками в 5 м.

Таблица 3.4. Результаты измерений длины волокна при многократном уменьшении её на один метр

№	Длина волокна L_N, в автоматическом режиме, км	Длина волокна L_N, в полуавтоматическом режиме, км	$L_{N+1} - L_N$ в автоматическом режиме, м	$L_{N+1} - L_N$ в полуавтоматическом режиме, м	Фактическое изменение длины волокна,м	Коэффициент отражения, дБ
1	L_1 = 68.2248	68.148	–	–	–	– 38.923
2	L_2 = 68.1328	68.133	–92	–15	0	– 14.576
3	L_3 = 68.1328	68.133	0	0	–2	–13.951
4	L_4 = 68.1328	68.133	0	0	–3	–17.529
5	L_5 = 68.1379	68.133	+5.1	0	–4	–20.778
6	L_6 = 68.1277	68.128	–10.1	–5	–5	–14.950
7	L_7 = 68.1277	68.128	0	0	–6	–14.580
8	L_8 = 68.1277	68.128	0	0	–7	–13.905
9	L_9 = 68.1226	68.123	–5.1	–5	–8	–13.823

Длина волокна измерялась в автоматическом и полуавтоматическом режиме. Результаты этих измерений для одной и той же длины волокна, как видно из первых двух столбцов таблицы, могут отличаться на несколько метров. В третьем и в четвертом столбце таблицы приведено измеренное значение изменения длины волокна, соответственно, в автоматическом и полуавтоматическом режиме. Фактическое изменение длины волокна приведено в пятом столбце. В последнем столбце приведены значения коэффициента отражения от торца волокна.

Из таблицы видно, что при многократном уменьшении длины волокна на 1 м измеренное значение длины волокна уменьшается, но не монотонно. Значение измеренной длины волокна зависит не только от его фактической длины, но и от величины коэффициента отражения света от торца волокна. Показания рефлектометра изменяются только после того, как длина волокна уменьшается на 2…3 м. При этом (если исключить из рассмотрения сколы волокон с малым коэффициентом отражения) измеренное значение длины волокна L_N уменьшается на величину интервала между точками, равному 5 м. Соответственно, точность измерения длины волокна не превышает 5 м.

При плохом сколе (они выделены в таблице) длина волокна получается больше, чем при хорошем сколе. Так, например, в начале волокно было обломано, и коэффициент отражения от торца волокна составил всего лишь –38.923 дБ. После того, как конец волокна был сколот, коэффициент отражения увеличился до –14.576 дБ, а длина волокна (по показаниям рефлектометра в автоматическом режиме) уменьшилась на 92 м. Фактически же длина волокна при этом уменьшилась всего лишь на 1 м.

Из результатов приведенных в таблице 3.4 видно, что разрешающая способность рефлектометра в измерении длины волокна зависит от качества скола торца волокна. Причина появления этой зависимости обсуждалась в предыдущем параграфе. В кратком изложении она заключается в следующем. При отражении импульса от хорошего скола торца волокна скорость нарастания сигнала определяется крутизной переднего фронта импульса. А при отражении от плохого скола сигнал зачнет заметно уменьшаться только после того, как через торец волокна пройдет не только весь передний фронт импульса, но и некоторая, доля самого импульса. Соответственно, при плохом сколе пороговый уровень достигается при большей длине волокна.

То, насколько сильно могут различаться результаты измерения толщины волокна при изменении коэффициента отражения от торца волокна, видно из первых двух строк таблицы 3.4. Характерно, что если в автоматическом режиме это расхождение достигает – 92 м, то в полуавтоматическом режиме, за счет более точного определения начала всплеска оно получается заметно меньше (–15 м). Минимальная же ошибка, с которой можно определить положение конца волокна, равна примерно половине ширины интервала между измеряемыми точками.

§ 6. Определение места повреждения волокон

Оптический кабель проектируется и применяется с таким расчетом, чтобы срок службы линии передачи был не менее 25 лет. Такой кабель, если он эксплуатируется в штатном режиме, обладает высокой степенью надежности. Но все же, за 25 лет кабель может быть поврежден случайно или умышлено. Случайные повреждения кабеля происходят, в основном, при земляных работах (около 40 %), умышленно его повреждают при кражах кусков кабеля (думая, что медный) или при стрельбе по нему из охотничьих ружей. Кроме того, кабель может быть поврежден грызунами или на линии может произойти авария (подвижка грунта, наводнение, удар молнии и т.д.).

В большинстве случаев (~80 %) повреждаются сразу все волокна в кабеле, что приводит к простою линии и, соответственно, к большим финансовым потерям. **Для примера, типичная стоимость простоя локальной сети за рубежом составляет около 100 тыс. долларов в минуту**. Поэтому место повреждения кабеля должно быть найдено максимально быстро. Однако сделать это, учитывая большую протяженность регенерационного участка линии (типичная длина ~100 км), часто бывает сложно.

С помощью рефлектометра можно измерить с хорошей точностью (порядка нескольких метров) длину волокна от начала линии до места повреждения волокна. Однако знания длины волокна недостаточно для того, чтобы определить положение места повреждения кабеля на трассе. Для этого нужно ещё осуществить привязку рефлектограммы к местности. Сделать это необходимо потому, что длина волокна, уложенного в кабель, обычно превышает длину кабеля, а длина кабеля в свою очередь превышает длину трассы.

Общим для всех конструкций оптического кабеля является то, что деформации кабеля, неизбежно возникающие под действием окружающей среды, не должны приводить к возникновению напряжения в волокне. Только в этом случае удается избежать появления в волокне дополнительных потерь и обеспечить большой срок службы кабеля. Так, например, для достижения срока службы ~25 лет величина относительного удлинения волокна не должна превышать 0.2 %, что в несколько раз меньше допустимой величины относительного удлинения кабеля.

Наиболее простым конструктивным решением, обеспечивающим механическую развязку волокна от несущих элементов кабеля, является свободная укладка волокна в кабель в виде спирали. При этом избыток волокна должен быть достаточно большим для того, чтобы деформации, которым подвергается кабель, приводили только к изменению шага спирали, и не создавали в волокне натяжения.

Величина избытка волокна зависит от конструкции кабеля. Так, например, волокно может быть уложено в виде спирали в трубчатом модуле (пластмассовом или металлическом) (рис. 3.9). Избыток волокна в таком модуле составляет 0.4...0.8%. Эти

модули обычно свиваются слоями (повивами) вокруг центрального элемента кабеля. Возникающий при этом избыток волокна может достигать уже нескольких процентов. **Для оценки – при избытке волокна около 3 % на расстоянии 30 км длина волокна может превысить длину кабеля примерно на 1 км.**

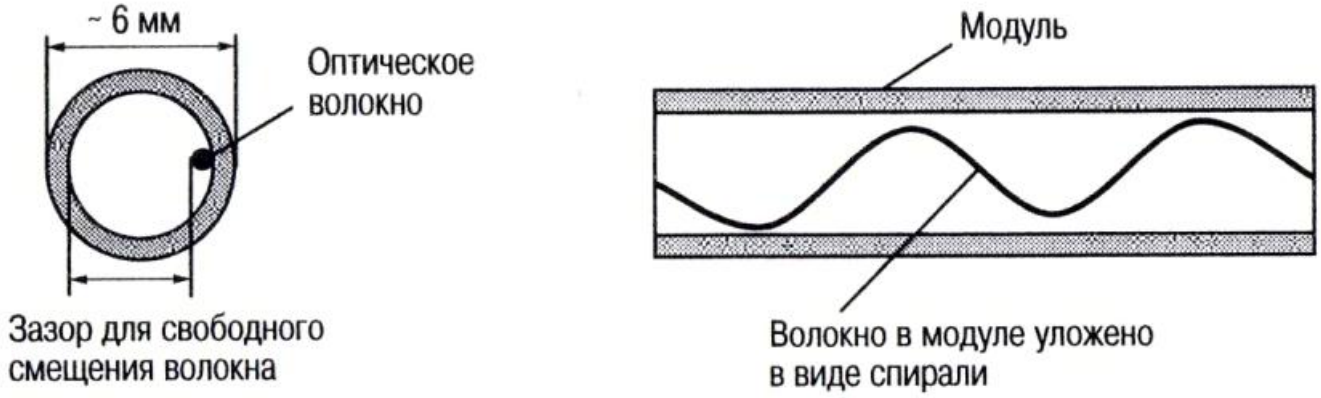


Рис. 3.9. Схема, поясняющая возникновение избытка волокна при его укладке в модуле

В свою очередь, длина кабеля может значительно (в 1.5 раза) превысить длину трассы. Происходит это потому, что кабель должен обходить различные препятствия и, кроме того, в линии имеются конструктивные запасы кабеля необходимые для его ремонта. Поэтому, несмотря на то, что с помощью рефлектометра можно с достаточно хорошей точностью измерить длину волокна от начала линии до места её повреждения, положение места повреждения волокна на местности будет известно с невысокой точностью порядка нескольких сот метров (рис. 3.10).

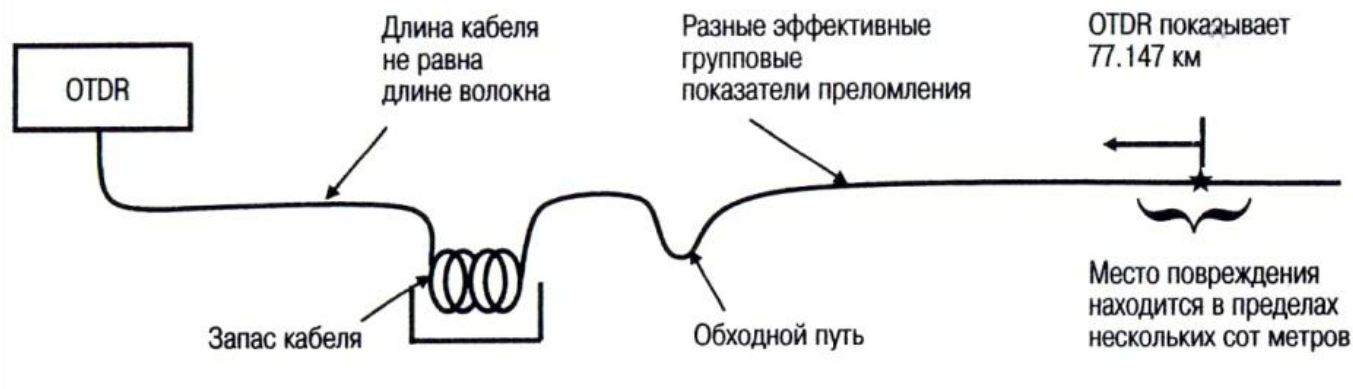


Рис. 3.10. Схема, поясняющая причины возникновения неопределенности при определении места повреждения волокна

Неопределенность в определении места повреждения волокна можно уменьшить, представив рефлектограмму как функцию длины кабеля (а не как функцию длины волокна). Сделать это можно, если вместо группового показателя волокна установить в рефлектометре некий эффективный показатель преломления $n_{эфф}$, позволяющий учесть избыток волокна в кабеле.

Для того, чтобы рассчитать величину $n_{эфф}$, нужно знать длину кабеля $L_К$ (её можно взять, например, из документации на кабель), групповой показатель преломления волокна $n_г$ (он обычно указывается производителем в спецификации на волокно) и длину волокна $L_В$ (она измеряется рефлектометром).

$$n_{эфф} = (L_К \times n_г) / L_К \qquad (3.2)$$

Найти величину $n_{эфф}$ можно и несколько иным способом, используя при вычислениях рефлектометр. Для этого надо установить курсоры на начало и конец кабельного участка известной длины и подобрать такое значение показателя преломления, при котором оптическая длина волокна будет равна физической длине кабеля.

Далее с помощью функции автопоиска надо идентифицировать все строительные длины кабелей в линии и ввести в рефлектометр соответствующий им эффективный показатель преломления. В результате рефлектограмма будет представлена, как функция длины кабельной линии.

На следующем этапе проводится привязка рефлектограммы к местности. Для этого, после завершения монтажа каждой муфты, записываются метки на кабеле с указанием его длины, а также километраж железной дороги или другого протяженного объекта, вдоль которого прокладывается кабель. В большинстве случаев такую привязку удается осуществить, так как из-за больших цен на землеотвод операторы связи стремятся использовать уже готовые инфраструктуры. Поэтому кабели часто прокладывают вдоль железных дорог ("Компания Трансгелеком"), линий электропередач ("Ростелеком") или в полосе отчуждения газопроводов ("Газтелеком") и нефтепроводов ("Связьтранснефть").

Если положение муфты на местности известно, то при определении места повреждения волокон расстояние можно отсчитывать не от начала линии, а от ближайшей муфты. Это расстояние (порядка строительной длины кабеля 2…5 км) значительно меньше длины регенерационного участка линии (~100 км) и неопределенность в определении места повреждения волокна будет, соответственно, значительно меньше. Кроме того, на относительно коротком участке трассы проще учесть изгибы кабеля и его конструктивные запасы.

При строительстве линий передачи часто используется технология прокладки кабеля в грунт. В этом случае возникает проблема поиска трассы. В России в грунт обычно прокладывают кабель бронированный стальной проволокой. Поэтому поиск трассы с таким кабелем (за счет наличия в нем металла) выполнить достаточно просто. В Казахстане, а иногда и в России, применяется технология задувки (затяжки) легкого небронированного кабеля в предварительно проложенную в грунт защитную пластмассовую трубку. Для облегчения поиска трассы с таким кабелем на некотором расстоянии поверх него в землю закапывается специальная металлическая лента. На этой ленте указывается километраж, и делаются надписи о том, что под ней находится оптический кабель (а не медный).

Некоторые линии передачи, обладающие большой пропускной способностью, снабжены системой дистанционного мониторинга. Эта система позволяет проводить трассировку линии передачи по географической карте, обеспечивая соответствие между маркерами установленными на этой карте и расстояниями на рефлектограмме. При этом на электронной карте местности отображается положение всех узлов кабеля: муфт, конструктивных запасов кабеля, кабельных колодцев, изгибов кабеля и т.д. Рабочее окно карты дает возможность вводить дополнительную информацию и осуществлять поиск узлов кабеля и мест обрыва волокна.

Однако далеко не все линии передачи снабжены системами дистанционного мониторинга. Кроме того, небольшие ошибки при трассировке линии в конечном итоге приводят к большой неопределенности в определении места положения обрыва волокна. Более того, в ряде случаев, например, при прокладке линии в степи, нельзя привязать к местности положение муфт и других узлов кабеля.

Для решения этой проблемы компанией Kingfisher разработан зажим, охлаждаемый жидким азотом. Он позволяет создавать неоднородности в волокне вблизи ожидаемого места повреждения волокна и осуществить более точную привязку к местности. Неоднородности в волокне создаются за счет того, что кабель изгибается в зажиме в нескольких местах. При охлаждении этого участка кабеля жидким азотом увеличивается жесткость покрытия волокна, а так как волокно в кабеле изогнуто, то в волокне возникают микроизгибы приводящие к появлению дополнительных потерь.

Рассмотрим пример применения такого зажима. С помощью рефлектометра было измерено расстояние до места повреждения волокна. Оно получилось (по показаниям рефлектометра) равным 77.147 км. По карте видно, что на расстоянии около 77 км трасса пересекает реку. Из телефонных переговоров с компанией, осуществлявшей прокладку кабеля, было выяснено, что, скорее всего повреждение произошло в кабеле уложенном в

реку. Однако было решено уточнить это место, проведя измерения с помощью охлаждаемого зажима (рис. 3.11).

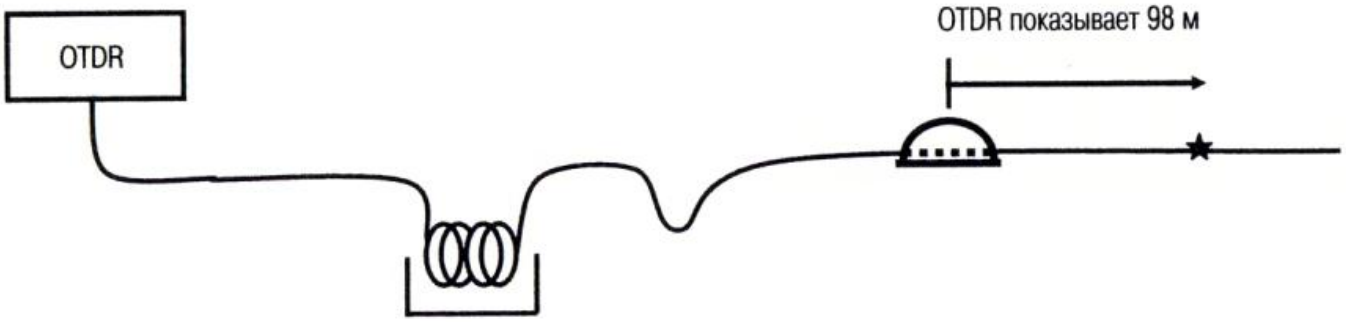


Рис. 3.11. Схема привязки места обрыва волокна в кабеле к местности с помощью охлаждаемого зажима

Охлаждаемый зажим был установлен на расстоянии порядка 40 м от берега реки, и была снята рефлектограмма трассы. Оказалось, что место повреждения волокна находится на расстоянии 98 м от зажима и на расстоянии примерно 130 м от берега реки. Т.е. место повреждения находится не в реке, как ожидалось, а на достаточно большом расстоянии от берега. Поврежденный участок кабеля выкопали и выяснили, что он был поврежден ковшом экскаватора, когда закапывали траншею с кабелем. Таким образом, удалось сэкономить значительное время и средства, которые пришлось бы затратить, доставая и укладывая новый кабель в реку.

Раздел II.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ

§ 7. Измерение полных и погонных потерь

Показания рефлектометра изменяются пропорционально логарифму отношения мощностей импульса света рассеянных в начале линии и на расстоянии z. Это отношение зависит от коэффициента пропускания линии (T(z)) и от коэффициента обратного релеевского рассеяния в Q(z), как: $\frac{P_{\text{об}}(z)}{P_{\text{об}}(0)} = T^2(z)\frac{Q(z)}{Q(0)}$. Коэффициент пропускания входит в квадрате, так как свет проходит через линию дважды: в качестве прямой и в качестве обратной волны. При этом учитывается, что в линии с одномодовыми волокнами коэффициент пропускания не зависит от направления распространения света.

Так как мощность обратной волны пропорциональна квадрату коэффициента пропускания, то в логарифмической шкале рефлектометра используется в два раза меньший коэффициент (логарифмические единицы выделены жирным курсивом): $A(z) = 5\log\left(\frac{P_{\text{об}}(0)}{P_{\text{об}}(z)}\right)$. Подставив сюда выражение для отношения мощностей рассеянных в волокне импульсов, получаем

$$A(z) = -10\log T(z) + 5\log\left(\frac{Q(0)}{Q(z)}\right) \qquad (3.3)$$

где первый член ($A_{\text{ист}}(z) \equiv -10\log T(z)$) в (3.3) равен величине истинных потерь (в единицах дБ) на участке линии от 0 до z, а второй член представляет собой систематическую ошибку, возникающую из-за вариаций коэффициента обратного релеевского рассеяния.

Распределение потерь в такой линии принято характеризовать тремя параметрами: полными потерями в линии (***A*** (дБ)), погонными потерями в строительных длинах

оптических кабелей (α (дБ/км)) и потерями в сростках волокон (a (дБ)). Полные потери в линии важны потому, что они определяют бюджет её мощности. Полные потери складываются в основном из потерь в строительных длинах оптических кабелей и потерь в сростках волокон. Величину этих потерь необходимо контролировать как в процессе монтажа, так и в процессе эксплуатации линии.

Как это видно из рис. 3.12, полные потери в линии передачи (A) равны разности уровней сигналов в начале и в конце рефлектограммы. Потери в сростке волокон (a) равны разности уровней сигналов в начале и конце изгиба рефлектограммы в месте положения сростка. Величина погонных потерь в строительных длинах оптического кабеля α(дБ/км) равна углу наклона линейных участков рефлектограммы.

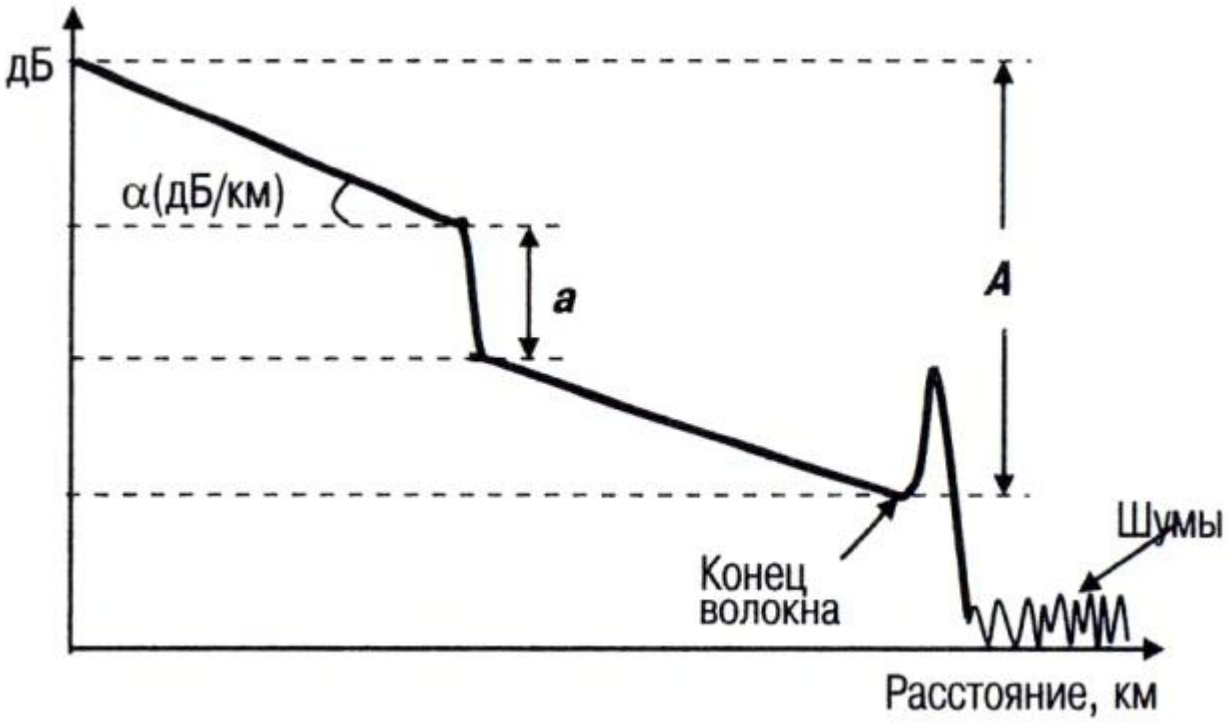


Рис. 3.12. Схема расчета потерь по рефлектограмме

Ошибки в измерении потерь минимальны, когда рефлектограмма не зашумлена, ширина зон нечувствительности (мертвых зон) мала, а коэффициент обратного релеевского рассеяния не зависит от продольной координаты z. В этом приближении ошибка в измерении величины полных потерь ΔA (дБ) = $A - A_{ист}$ обусловлена нелинейностью вертикальной шкалы рефлектометра: K (дБ/дБ) = $(A - A_{ист})/A_{ист}$, где A – измеренное значение истинных потерь, а $A_{ист}$ – истинное значение потерь. Ошибка ΔA выражается через коэффициент нелинейности K соотношением

$$\Delta A = K \times A, \tag{3.4}$$

Оценим величину ошибки при измерении полных потерь порядка 20 дБ (длина линии 100 км, погонные потери 0.20 дБ/км (λ = 1550 нм)). В наиболее совершенных моделях рефлектометров нелинейность шкалы $K \sim 0.02$ дБ/дБ. С помощью (3.4) находим, что ошибка будет равна 0.4 дБ. Величина этой ошибки сравнима с величиной средних потерь в оптических разъемах (0.1...0.3 дБ).

Ошибка при измерении погонных потерь α (дБ/км) = A/L складывается из ошибки в измерении полных потерь A на участке линии длиной L и ошибки в измерении длины этого участка линии. Учитывая, что точность измерения длины намного выше, чем точность измерения полных потерь, погрешность в измерении величины погонных потерь также определяться величиной коэффициента нелинейности (K)

$$\Delta\alpha\,(\text{дБ/км}) = K \times \alpha\,(\text{дБ/км}) \tag{3.5}$$

Для типичной величины погонных потерь α (дБ/км) = 0.20 дБ/км (на λ = 1550 нм) с помощью (3.5) получаем: $\Delta\alpha$ = 0.004 дБ/км.

§ 8. Измерение потерь в сростках волокон

Рефлектограмма только одного волокна в линии содержит несколько десятков ступенек, вызванных потерями в сростках волокон. Если учесть то, что оптический кабель содержит несколько десятков волокон, то становится понятным, что анализ такого большого числа неоднородностей целесообразнее всего проводить в автоматическом режиме. Этот режим позволяет анализировать рефлектограммы наиболее быстрым и удобным способом и не требует от оператора наличия специальных навыков.

Однако в автоматическом режиме удается обнаружить не все сростки волокон, так как вызванное ими изменение сигнала может быть недостаточным для того, чтобы пересечь некий пороговый уровень. Выбор величины этого порогового уровня всегда является определенным компромиссом. Так, с одной стороны, для того, чтобы зарегистрировать сростки волокон с малыми потерями, пороговый уровень должен быть мал. А с другой стороны, этот пороговый уровень должен быть достаточно большим для того, чтобы шумовые всплески сигнала не были приняты за сростки волокон (они наиболее сильны в конце рефлектограммы) (рис. 3.13).

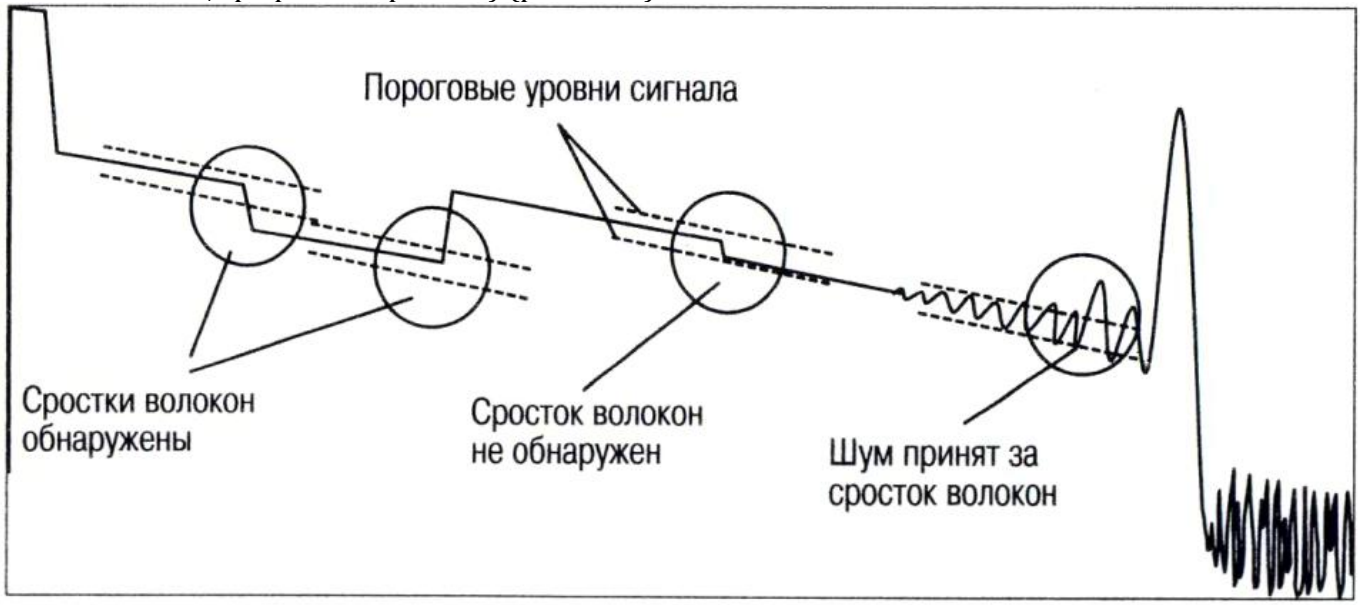


Рис. 3.13. Схема обнаружения неоднородности на рефлектограмме

При двухстороннем анализе рефлектограмм (он проводится для того, чтобы исключить ошибки, вызванные флуктуациями диаметра модового пятна волокна) необходимо, чтобы число сростков волокон и их положение на рефлектограммах, измеренных с двух сторон линии, было одинаковым. Т.е. необходимо, чтобы маркеры на этих рефлектограммах стояли на одних и тех же местах и, при этом не было сростков волокон, не отмеченных маркерами, а также не было шумовых всплесков сигнала, отмеченных маркерами.

Поиск пропущенных сростков волокон и устранение ложных сигналов удобнее всего проводить в полуавтоматическом режиме. В этом режиме можно просмотреть в увеличенном масштабе места соединений строительных длин оптических кабелей (где собственно и должны находится сростки волокон). При этом можно изменить величину порогового уровня и измерить потери тех сростках волокон, которые не были зарегистрированы в автоматическом режиме, и выставить на них маркеры.

Поиск местоположения сростков волокон существенно упрощается, когда на дисплей выводятся рефлектограммы нескольких соседних волокон в кабеле, так как для всех волокон в кабеле сростки волокон находятся на одинаковом расстоянии (в местах расположения муфт). При этом достаточно расставить правильно маркеры только для

одного волокна в линии, так как для остальных волокон маркеры должны находится на тех же местах.

В полуавтоматическом режиме измерения потерь в сростках волокон могут быть выполнены двумя способами: путем установки двух курсоров и более точным способом путем установки пяти курсоров. В первом способе достаточно установить один курсор на начало, а другой на конец ступеньки в рефлектограмме. Величина потерь определяется по разности уровней сигналов в начале и конце ступеньки (рис. 3.14). Этот способ обычно применяется при измерении потерь на отдельных участках линии. Для измерения потерь в неоднородностях он используется в тех случаях, когда имеется несколько близко расположенных неоднородностей.

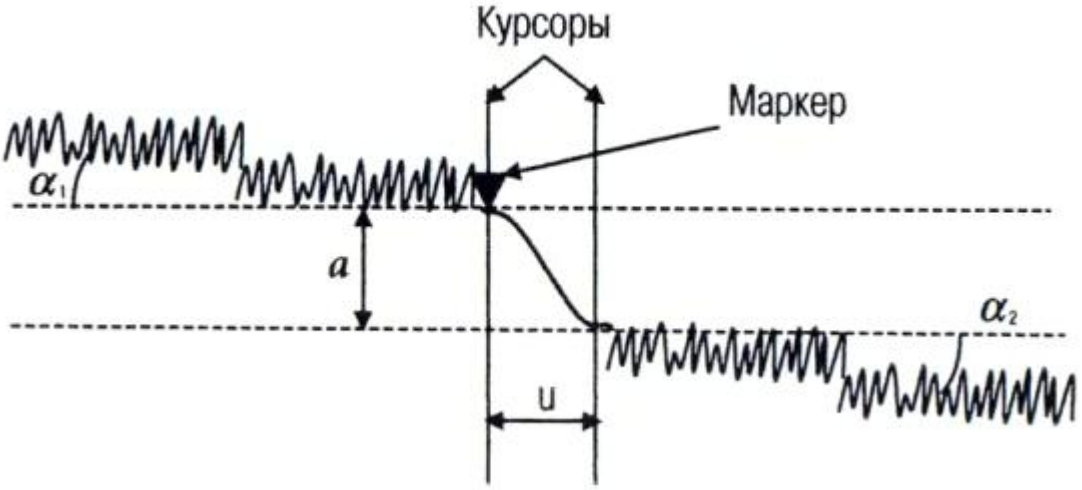


Рис. 3.14 Схема измерения потерь в сростке волокон с помощью двух курсоров

При измерении потерь с помощью двух курсоров возникают два вида методических ошибок. Одна вызвана тем, что рефлектограмма зашумлена и курсор может быть выставлен не на середину шумовой дорожки, а на шумовой выброс сигнала (вверх или вниз). Другая ошибка обусловлена конечной длительностью импульса. Эта ошибка возникает из-за того, что разность уровней сигналов в начале и конце ступеньки обусловлена не только потерями в сростке волокон, но и потерями в волокне.

Методическая ошибка, обусловленная конечной длительностью импульса, равна произведению ширины импульса света (на дисплее) на среднюю величину погонных потерь в волокнах до и после сростка

$$\Delta a_1 = \frac{u(\alpha_1 + \alpha_2)}{2}. \qquad (3.6)$$

Оценим её величину. Полагая $\alpha_1 \cong \alpha_2 = 0.2$ дБ/км (λ = 1550 нм), получаем: $\Delta \boldsymbol{a}_1$ = 0.2 дБ при u = 1 км (длительность импульса 10 мкс) и $\Delta \boldsymbol{a}_1$ = 0.002 дБ при u = 10 м (длительность импульса 100 нс). Таким образом, при больших длительностях импульса (~10 мкс) величина $\Delta \boldsymbol{a}_1$ существенно превышает средние потери в сростке SM волокон (~0.02 дБ), а при малых длительностях порядка 100 нс и меньше эта ошибка пренебрежимо мала.

Обе эти методические ошибки устраняются при измерении потерь с помощью пяти курсоров. В этом методе один курсор устанавливается на начало ступеньки и автоматически помечается маркером. Остальные четыре курсора устанавливаются на начало и конец наклонных участков рефлектограммы, расположенных до и после сростка волокон. После того как курсоры установлены, через эти наклонные участки автоматически проводятся аппроксимирующие их наклонные прямые линии. Величина потерь определяется по расстоянию между этими наклонными прямыми линиями в точке, где находится маркер (рис. 3.15) и не зависит, поэтому, от длительности импульса.

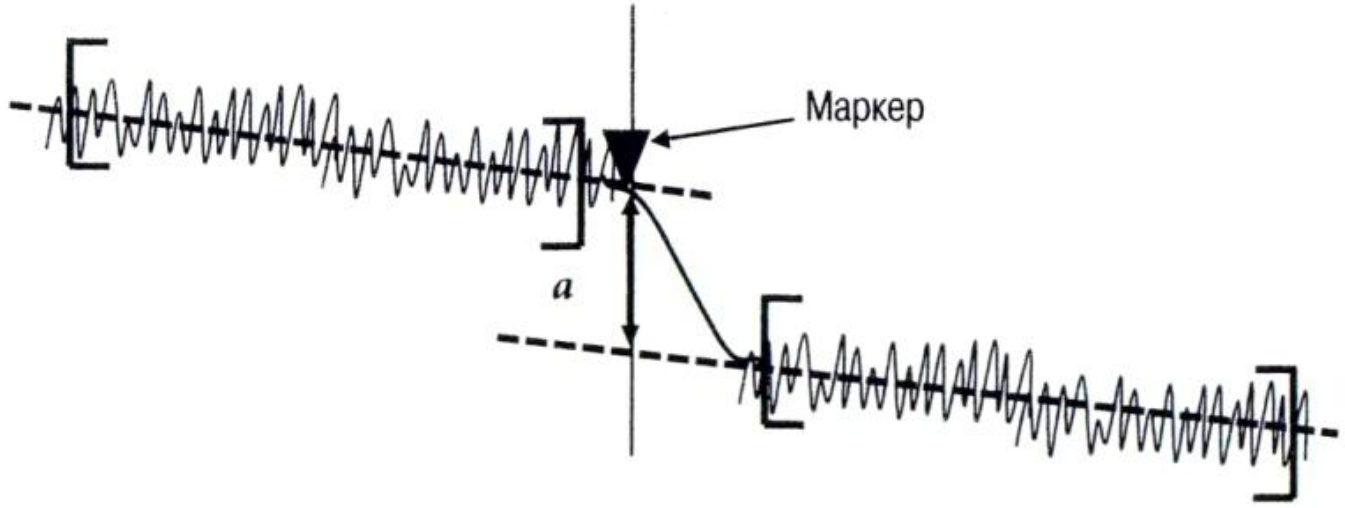


Рис. 3.15 Схема измерения потерь в сростке волокон с помощью пяти курсоров

Аппроксимирующие прямые линии могут быть проведены двумя способами. Метод наименьших квадратов (LSA – least-squares approximation) применяется, когда наклонные участки рефлектограммы зашумлены однородно. Если же на наклонном участке рефлектограммы имеется всплеск сигнала отражения от неоднородности или ступенька из-за потерь, то аппроксимирующая прямая линия, проведенная с помощью LSA метода, пройдет выше середины шумовой дорожки (рис. 3.16 а).

В этом случае аппроксимирующую прямую линию проводят методом двух точек (2PA – two point approximation), соединяя непосредственно точки, отмеченные на рефлектограмме курсорами. При этом надо следить, чтобы точки, через которые проводятся эти прямые линии, находились примерно на середине шумовой дорожки, а не попали шумовой выброс сигнала (рис. 3.16 б).

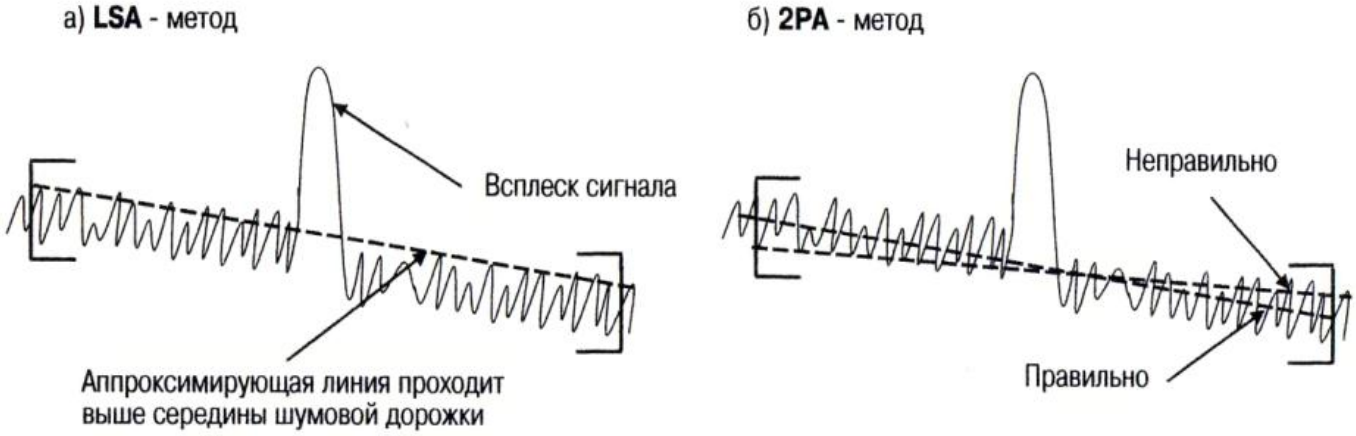


Рис. 3.16. Ошибки, возникающие при проведении прямых линий, аппроксимирующих зашумленные наклонные участки рефлектограмм: (а) LSA - методом, (б) 2PA –методом

Метод пяти курсоров позволяет устранить методическую ошибку, обусловленную конечной длительностью импульса. В этом случае ошибка в измерении малых потерь в сростках волокон будет определяться величиной шумов в рефлектограмме. Величина потерь в сростках волокон определяется по разности уровней сигналов в начале и конце ступеньки. Из-за шумов рефлектограммы это расстояние является случайной величиной и, поэтому можно говорить только о наиболее вероятном значении измеряемой величины потерь и ожидаемой ошибке измерений.

Так как наиболее вероятное измеряемое значение потерь равно среднему значению потерь в сростке волокон $\langle a \rangle$, то оно равно, соответственно, расстоянию между прямыми линиями аппроксимирующими зашумленные наклонные участки рефлектограмм. А ожидаемую ошибку измерений, в предположении, что шумы распределены по нормальному (гауссовому) закону, обычно записывают в виде

$$\Delta a = 2\sigma; \qquad (3.7)$$

где σ – среднеквадратичное значение шумов в рефлектограмме. Такая запись означает, что измеренное значение, a с вероятностью 95 % попадает в интервал, $\langle a \rangle \pm 2\sigma$.

§ 9. Влияние мертвых зон

Конечная ширина импульсов приводит к появлению на рефлектограмме зон нечувствительности (мертвых зон). Наиболее широкие мертвые зоны возникают вблизи отражающих неоднородностей (рис. 3.17), так как мощность отраженных импульсов обычно значительно превышает мощность импульсов, рассеянных на релеевских центрах в волокне. Причем отражение от оптического разъема рефлектометра, как правило, приводит к насыщению фотоприемника, и поэтому мертвая зона в начале рефлектограммы получается наиболее широкой.

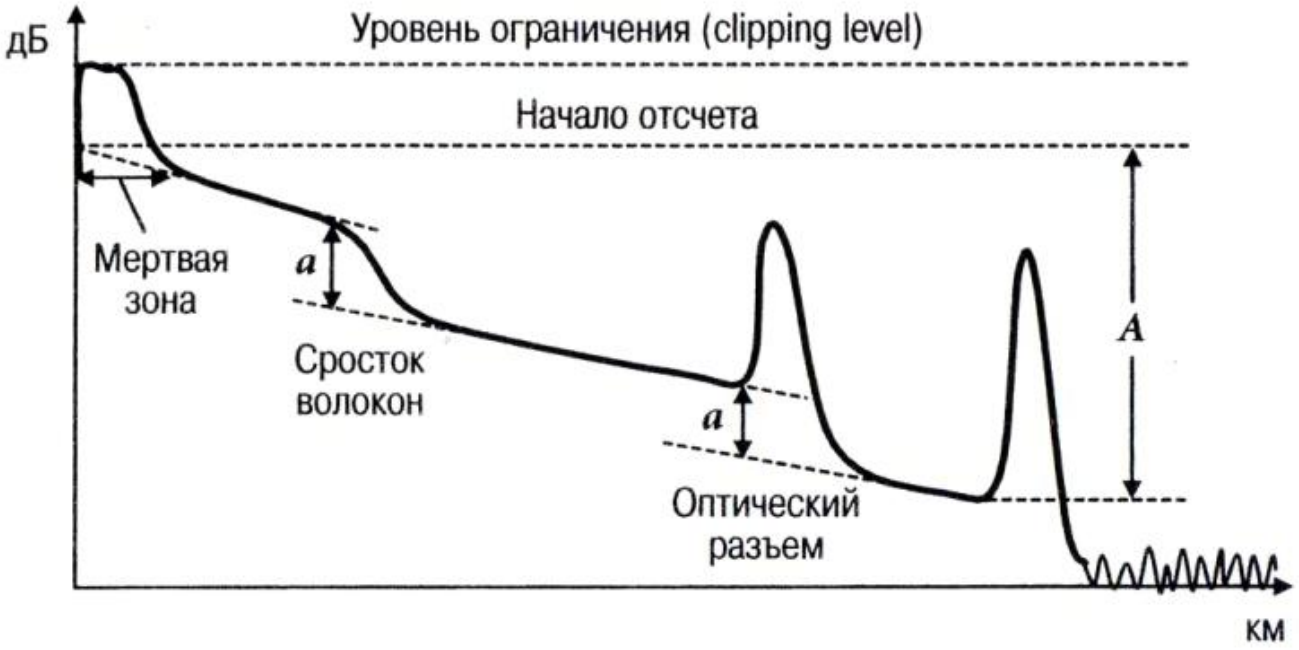


Рис. 3.17. Схема нахождения распределения потерь в линии по рефлектограмме с мертвыми зонами

Появление на рефлектограмме мертвых зон осложняет процедуру измерений. Так, например, для расчета полных потерь в линии (A) необходимо знать начальный уровень сигнала на вертикальной оси (оси ординат). Положение этого уровня маскируется мертвой зоной в начале рефлектограммы. Поэтому первый линейный участок рефлектограммы экстраполируется (продолжается) до пересечения с осью ординат. Точка пересечения этой прямой с осью ординат принимается за положение начального уровня сигнала.

Величина потерь в неоднородностях (a) находится по расстоянию между прямыми линиями, продолжающими линейные участки рефлектограммы до и после неоднородности. Эти прямые линии, вообще говоря, не параллельны, так как погонные потери в соединяемых волокнах не равны между собой.

Поэтому расстояние между ними зависит от того, в каком месте оно измеряется. Обычно это расстояние измеряется в начале изогнутого участка рефлектограммы. В этом случае появляется дополнительная ошибка, зависящая от того, с какой стороны линии измеряются потери (рис. 3.18).

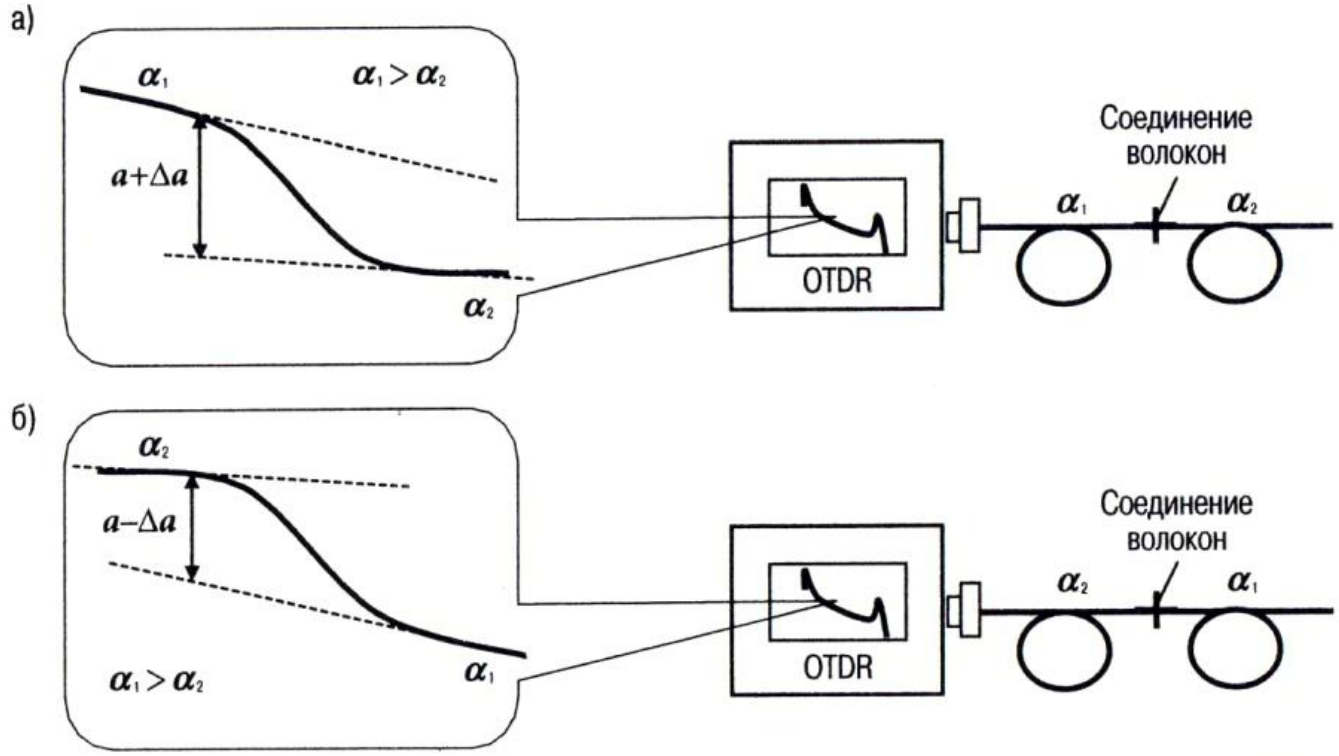


Рис. 3.18. Зависимость величины измеренных потерь вместе соединения волокон от разности их погонных потерь: а) Рефлектометр подключен со стороны волокна с большими погонными потерями б) Рефлектометр подключен со стороны волокна с меньшими погонными потерями

Величина этой ошибки зависит от ширины импульса света в волокне (u) и разности коэффициентов погонных потерь в соединяемых волокнах.

$$\Delta a = 0.5 \times u \times (\alpha_1 - \alpha_2). \qquad (3.8)$$

При типичном значении $\alpha_1 - \alpha_2 = 0.02$ дБ/км ошибка мала. Так при ширине импульса u = 10 м (длительность импульса $\tau = 100$ нс) эта ошибка равна 0.0001 дБ, и увеличивается при u = 1 км ($\tau = 10$ мкс) до 0.01 дБ. Поэтому её обычно не учитывают, кроме того, она устраняется при усреднении результатов измерений потерь с двух сторон линии передачи.

§ 10. Ошибки из-за флуктуации диаметра модового пятна

В методе оптической рефлектометрии распределение потерь в волокне находится по изменению рассеянной назад в волокне мощности зондирующих импульсов. Однако эта мощность изменяется не только из-за потерь в волокне, но и из-за вариаций коэффициента обратного релеевского рассеяния. По рефлектограмме, измеренной только с одной стороны волокна, нельзя определить, вызвано ли изменение рассеянной назад мощности потерями в волокне или изменением коэффициента обратного релеевского рассеяния. Поэтому вариации коэффициента обратного релеевского рассеяния приводят к появлению систематической ошибки при измерении потерь в волокне.

Наиболее сильно эта ошибка сказывается при измерении потерь в сростках волокон, где величина потерь обычно мала, а разность коэффициентов обратного релеевского рассеяния максимальна. При этом в месте соединения волокон часто наблюдается не только уменьшение сигнала из-за потерь, но и его увеличение (gainer). Поясним это явление на примере соединения двух волокон с постоянными по длине, но разными коэффициентами обратного релеевского рассеяния (рис. 3.19).

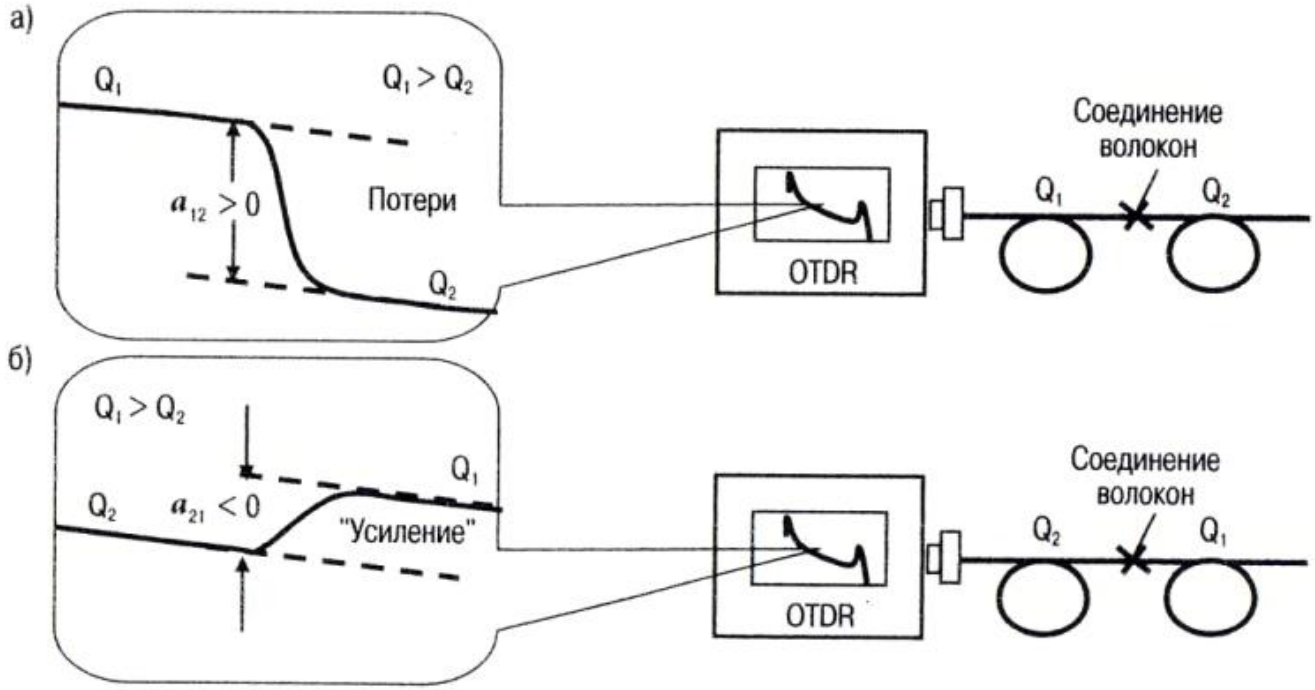


Рис. 3.19. Участок рефлектограммы вместе сварного соединения волокон с разными коэффициентами обратного релеевского рассеяния

а) Рефлектометр подключен со стороны волокна с большим коэффициентом обратного релеевского рассеяния

б) Рефлектометр подключен со стороны волокна с меньшим коэффициентом обратного релеевского рассеяния

Величина измеренных потерь в сростках волокон прямо пропорциональна десятичному логарифму отношения мощности обратной волны рассеянной в первом волокне (непосредственно до сростка волокон) к мощности обратной волны рассеянной во втором волокне (непосредственно за сростком волокон): $a = 5\log\frac{P_{об,1}}{P_{об,2}}$**.** Когда рефлектометр подключен со стороны волокна с коэффициентом обратного релеевского рассеяния Q_1, то $\frac{P_{об,1}}{P_{об,2}} = T_c^2\frac{Q_1}{Q_2}$, где T_c – коэффициент пропускания сростка волокон. Если же рефлектометр подключен со стороны волокна с коэффициентом обратного релеевского рассеяния Q_2, то $\frac{P_{об,2}}{P_{об,1}} = T_c^2\frac{Q_2}{Q_1}$. Таким образом, выражения для потерь в сростках волокон измеренных во встречных направлениях ($\boldsymbol{a}_{12}$ и $\boldsymbol{a}_{21}$) можно записать в виде

$$\boldsymbol{a}_{12} = \boldsymbol{a}_{ист} + \Delta\boldsymbol{a} \qquad (3.9)$$
$$\boldsymbol{a}_{21} = \boldsymbol{a}_{ист} + \Delta\boldsymbol{a}$$

где $\boldsymbol{a}_{ист} = -10\log T_c$ – истинные потери в сростке волокон, а $\Delta\boldsymbol{a} = 5\log(Q_1/Q_2)$ – систематическая ошибка, возникающая из-за разности коэффициентов обратного релеевского рассеяния.

При $Q_1 > Q_2$, систематическая ошибка $\Delta\boldsymbol{a} = 5\log(Q_1/Q_2) > 0$. Поэтому измеренное значение $\boldsymbol{a}_{12} > \boldsymbol{a}_{ист} > \boldsymbol{a}_{21}$. Т. е. при подключении рефлектометра со стороны волокна с большим коэффициентом обратного релеевского рассеяния величина измеренных потерь получается больше истинных потерь в сростке волокон, а при подключении рефлектометра с другой стороны меньше истинных потерь. Более того, если потери в сростке волокон настолько малы так, что выполняется условие $\boldsymbol{a}_{ист} < \Delta\boldsymbol{a}$, измеренное значение потерь $\boldsymbol{a}_{21}$ может стать отрицательным. Т.е. будет наблюдаться кажущееся усиление сигнала, как это показано на рис. 3.19 б.

Оценим величину этой систематической ошибки. Для этого надо учесть, что коэффициент обратного релеевского рассеяния прямо пропорционален произведению коэффициента релеевского рассеяния α_p на коэффициент захвата рассеянного излучения

модой волокна S, а коэффициент захвата прямо пропорционален квадрату апертурного угла моды (θ) и обратно пропорционален квадрату диаметра модового пятна (w) (рис. 3.20).

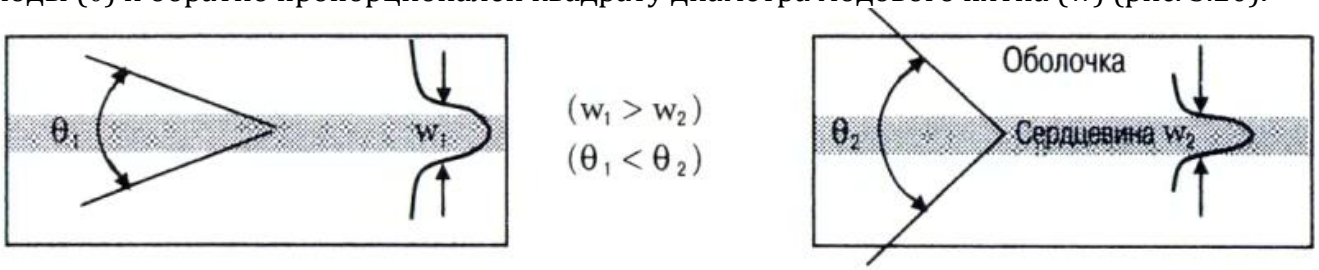


Рис. 3.20. Доля мощности, рассеиваемая назад в моду волокна обратно пропорциональна квадрату диаметра модового пятна

В современных волокнах флуктуации коэффициента обратного релеевского рассеяния обусловлены, в основном, флуктуациями диаметра модового пятна. Учитывая, что величина коэффициента захвата обратно пропорциональна квадрату диаметра модового пятна, выражение для систематической ошибки можно записать в виде: $\Delta\boldsymbol{a} = 10\log(w_2/w_1)$. В приближении $\Delta w << w$, где $w = (w_1 + w_2)/2$ и $\Delta w = w_1 - w_2$, выражение для $\Delta\boldsymbol{a}$ приводится к виду: $\Delta\boldsymbol{a} = 4.34\,\Delta w/w$.

Разность диаметров модовых пятен ($\Delta w = w_1 - w_2$) является случайной величиной со средним значением ($<\Delta w>$) равным нулю. Поэтому для оценки $\Delta\boldsymbol{a}$ возьмем её среднеквадратичное значение: $\sqrt{\langle \Delta a^2 \rangle} = 4.34\dfrac{\sqrt{\langle \Delta w^2 \rangle}}{w}$. При этом будем полагать, что диаметры модовых пятен распределены по нормальному закону с дисперсией равной σ^2. Тогда разность диаметров модовых пятен Δw также будет распределена по нормальному закону (с дисперсией $2\sigma^2$), а систематическая ошибка в этом случае будет равна: $\sqrt{\langle \Delta a^2 \rangle} = 4.34\dfrac{\sqrt{2}\cdot\sigma}{w}$.

В спецификациях на волокна в качестве доверительного интервала принято указывать не σ, а $\Delta w_д = 3\sigma$, соответственно, величина систематической ошибки приближенно равна удвоенному отношению величины доверительного интервала к диаметру модового пятна:

$$\sqrt{\langle \Delta a^2 \rangle} = \frac{2\Delta w_д}{w} \qquad (3.10)$$

При типичных значениях $w \approx 10$ мкм и $\Delta w_д = 0.4$ мкм получаем оценку: $\sqrt{\langle \Delta a^2 \rangle} = 0.08$ дБ. Эта величина заметно больше средних потерь (~0.02 дБ) в сростках SM волокон и много меньше типичной величины полных потерь в линии (~20 дБ). Таким образом, при измерении полных потерь в линии систематической погрешностью можно пренебрегать и проводить измерения только с одной стороны линии. При измерении же потерь в сростках волокон систематическую погрешность, возникающую из-за разности диаметров модовых пятен, необходимо исключать.

§ 11. Двухсторонний анализ рефлектограмм

Флуктуации диаметра модового пятна в волокнах приводят, как было показано ранее, к появлению систематической погрешности с величиной среднеквадратичного отклонения порядка 0.1 дБ, что заметно больше средних потерь в сростках SM волокон (~0.02 дБ). Из-за случайного характера вариаций диаметра модового пятна их разность с одинаковой вероятностью может быть как положительной, так и отрицательной. Поэтому на рефлектограммах с примерно одинаковой вероятностью наблюдаются ступеньки направленные как вниз, так и вверх. Ясно, что в этом случае по рефлектограмме, измеренной только с одной стороны линии, нельзя найти величину потерь в сростке волокон.

Как видно из (3.9), для того, чтобы исключить систематическую ошибку, возникающую из-за разности коэффициентов обратного релеевского рассеяния, надо вычислить среднее значение потерь в сростке волокон:

$$\boldsymbol{a}_{\text{ист}} = (\boldsymbol{a}_{12} + \boldsymbol{a}_{21})/2 \qquad (3.11)$$

где $\boldsymbol{a}_{12}$ и $\boldsymbol{a}_{21}$ – значения потерь в сростке волокон рассчитанные по рефлектограммам, измеренным во встречных направлениях. В качестве примера рассчитаем истинное значение потерь в сростках волокон (рис. 3.21 и рис. 3.22).

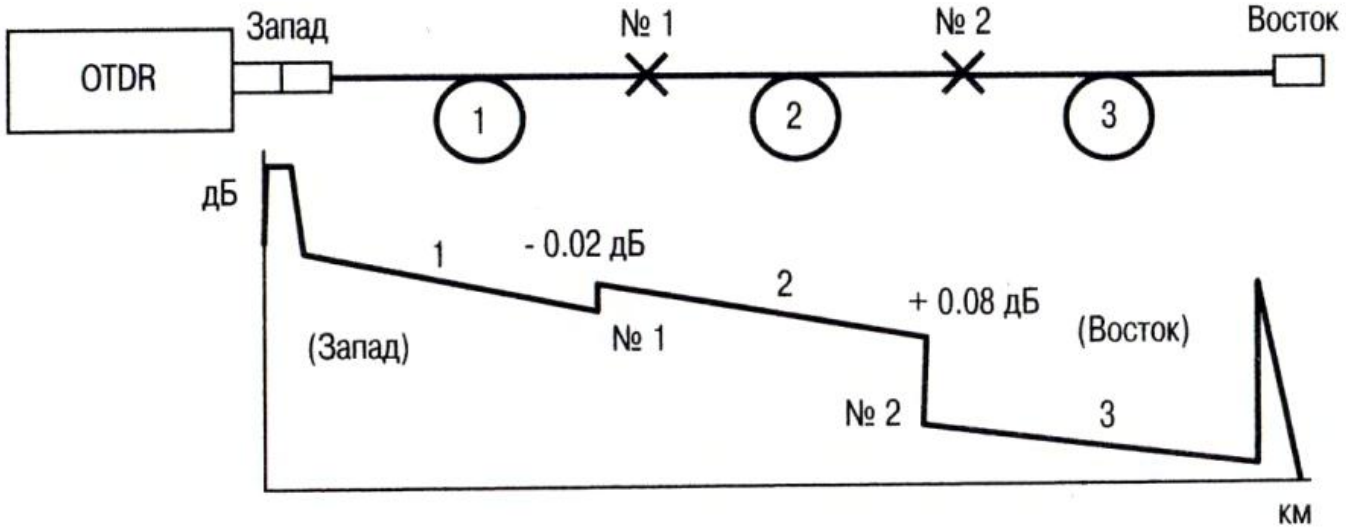


Рис. 3.21. Рефлектограмма, измеренная в направлении Запад – Восток

При измерении в направлении Запад-Восток (рис. 3.21) измеренное значение потерь в сварном соединении волокон №1 имеет отрицательный знак ($\boldsymbol{a}_{\text{из},1}$ = – 0.02 дБ), т.е. наблюдается «усиление» сигнала. В сварном соединении волокон № 2 измеренное значение потерь имеет положительный знак ($\boldsymbol{a}_{\text{из},2}$ = + 0.08 дБ), как и должно быть при потерях излучения.

Истинные значения потерь $\boldsymbol{a}_1$ в сростке волокон №1 и $\boldsymbol{a}_2$ в сростке волокон №2 можно найти, исключив с помощью (3.11) систематические ошибки. Для этого надо провести измерения потерь в линии с другой стороны (в направлении Восток-Запад). Рефлектограмма, измеренная в направлении Восток- Запад, изображена на рис. 3.22.

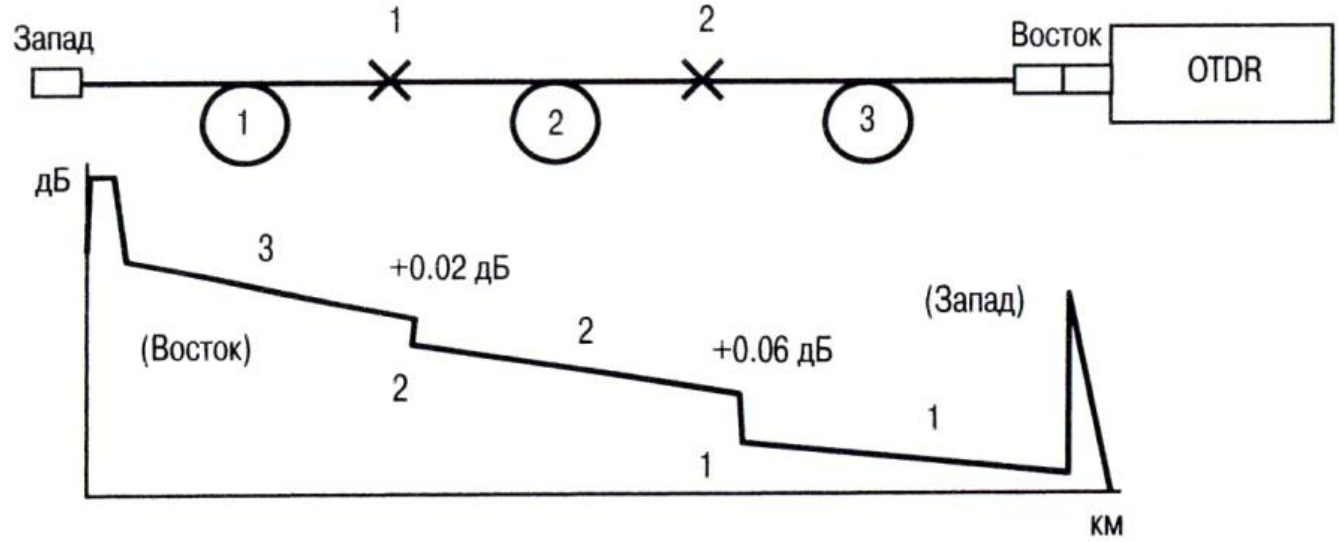


Рис. 3.22. Рефлектограмма, измеренная в направлении Восток- Запад

Значения потерь в сростках волокон, измеренные в направлении Восток-Запад, имеют положительный знак: $\underline{\boldsymbol{a}}_{\text{из},2}$ = + 0.02 дБ (в сварном соединении волокон №2) и $\underline{\boldsymbol{a}}_{\text{из},1}$ = + 0.06 дБ (в сварном соединении волокон №1). Результаты расчета истинного

значения потерь в сростках волокон 1 и 2, а также систематической ошибки, возникающей из-за разности диаметров модовых пятен соединяемых волокон, приведены в таблице №3.5.

Таблица № 3.5. Результаты расчета истинного значения потерь в сростках волокон по значениям потерь измеренных с помощью рефлектограмм рис. 3.21 и рис. 3.22

Номер сростка волокон	Измеренные потери, дБ (Запад➔Восток)	Измеренные потери, дБ (Восток➔Запад)	Истинные потери, дб	Систематическая ошибка, дБ
№1	$a_{из,1}$ = – 0.02	$a_{из,1}$ = + 0.06 дБ	a_1 = + 0.02	– 0.04 (З➔И) + 0.04 (В➔З)
№2	$a_{из,2}$ = + 0.08	$a_{из,2}$ = + 0.02 дБ	a_2 = + 0.05	+ 0.03 (З➔И) – 0.03 (В➔З)

Истинные потери в сростках волокон могут быть рассчитаны, по рефлектограммам, измеренным с двух сторон линии, не только вручную, как это сделано в этом примере, но и в автоматическом режиме. Для этого новые модели рефлектометров снабжены специальными программами.

§ 12. Измерения на двух длинах волн

Потери линии передачи обычно измеряют на той длине волны, на которой осуществляется передача трафика (в магистральных линиях на λ = 1550 нм, а в городских линиях на λ = 1310 нм). Но если в линии обнаружены избыточные потери, то измерения проводят на обеих этих длинах волн. Измерения на двух длинах волн позволяют выявить наличие сильных изгибов волокон – одного из основных механизмов приводящих к появлению избыточных потерь.

В этом методе используется тот факт, что потери, вносимые при изгибе SM волокна, значительно сильнее зависят от длины волны (рис. 3.23), чем потери вызванные другими механизмами, такими как релеевское рассеяние, смещение сердцевин волокон, флуктуации модового пятна и т.д. Так, например, если потери, вносимые при намотке волокна на оправку диаметром 30 мм на λ = 1310 нм составляют всего лишь 0.03 дБ, то на λ = 1550 нм они уже существенно больше (~0.6 дБ).

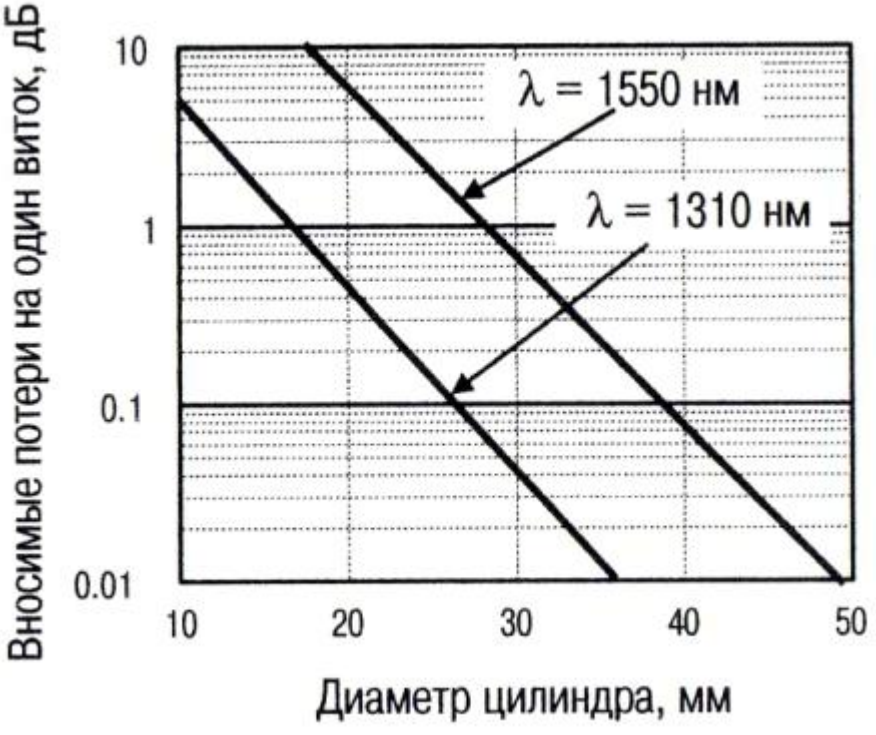


Рис. 3.23. Потери, вносимые при изгибе SM волокон

Как видно из рис. 3.23, потери, вносимые при изгибе SM волокон, быстро уменьшаются при увеличении радиуса изгиба. Поэтому, если не допускать сильных изгибов волокна, вносимые потери будут пренебрежимо малы. Однако на практике не всегда удается избежать появления сильных изгибов волокна. Они могут возникнуть из-за нарушений технологии при изготовлении оптических кабелей и при их инсталляции в линию передачи. Часто такие изгибы возникают при укладке сварных соединений волокон в муфты и оптических шнуров в распределительные шкафы.

Возможность появления избыточных потерь в строительных длинах оптических кабелей контролируется на всех этапах монтажа линии, начиная от входного и предмонтажного контроля этих кабелей. При этом контролируются не только погонные потери, но и ступеньки в рефлектограмме, величина которых (в соответствии со спецификациями на волокно) не должна превышать 0.10 дБ. Типичные рефлектограммы, получаемые при входном контроле оптических кабелей, изображены на рис. 3.24.

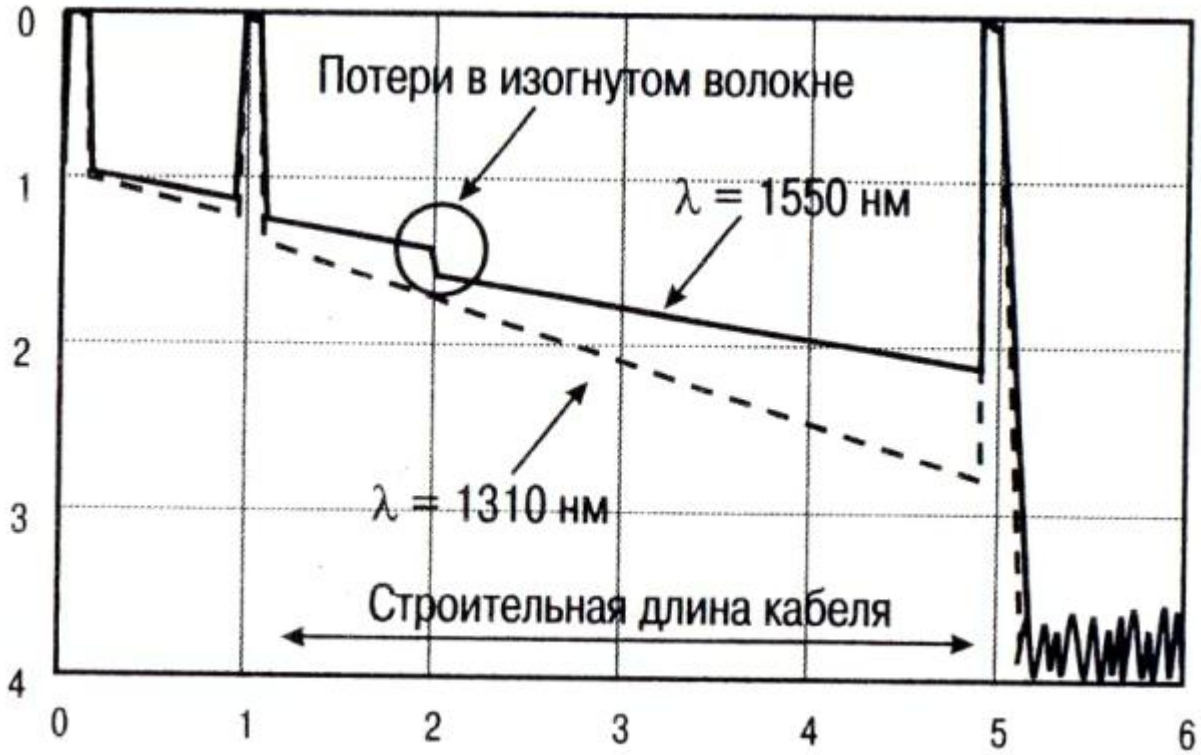


Рис. 3.24. Рефлектограммы, измеренные на длинах волн 1310 нм и 1550 нм

На рефлектограммах видны всплески сигналов отражения от места соединения оптического разъема рефлектометра с согласующим кабелем (длиной ~1 км), от места соединения согласующего кабеля с исследуемым волокном (подключенным через адаптер) и от торца волокна. Наклон рефлектограммы, измеренной на λ = 1310 нм, больше чем на λ = 1550 нм, как и должно быть, так как минимальными погонными потерями волокно обладает на λ = 1550 нм.

Типичные значения погонных потерь в SM волокнах равны 0.34...0.35 дБ/км на λ = 1310 нм и 0.20...0.23 дБ/км на λ = 1550 нм. По специальному заказу кабельный завод может изготовить кабель с предельно низкими на сегодняшний день потерями: 0.19 дБ/км (на λ = 1550 нм). Дополнительные потери, наводимые при кабрировании, обычно не превышают 0.01...0.02 дБ/км.

Если в волокне имеются достаточно сильные изгибы, то погонные потери увеличиваются, причем в первую очередь на λ = 1550 нм так, что наклон рефлектограммы на этой длине волны может получиться даже больше, чем на λ = 1310 нм. Однако чаще изгибы волокна локализованы и приводят к появлению ступеньки на рефлектограмме. Так, например, на рис. 3.24 рефлектограмма (на λ = 1550 нм) имеет ступеньку (~0.2 дБ), находящуюся на расстоянии 2 км от начала. В тоже время на рефлектограмме, измеренной

на λ = 1310 нм, такой ступеньки нет. Это означает, что в этом месте волокно сильно изогнуто.

Чаще всего сильные изгибы волокон возникают при укладке сростков волокон в муфты и оптических шнуров в распределительные шкафы. При этом сильно изогнутый участок волокна находится обычно близко к месту соединения волокон. В этом случае пространственного разрешения рефлетометра обычно бывает недостаточно для того, чтобы определить, из-за чего возникли избыточные потери – из-за плохого соединения волокон или их сильных изгибов.

Наличие сильно изогнутого участка волокна можно выявить, проведя измерения на двух длинах волн. Сделать это важно из чисто практических соображений. Так, например, если будет выявлено, что избыточные потери возникли из-за изгиба волокон, то не надо будет переделывать места соединений волокон, что требует определенных временных и финансовых затрат. В этом случае достаточно более аккуратно уложить волокна в муфту (или оптические шнуры в распределительном шкафу), что сделать значительно проще. В качестве иллюстрации рассмотрим, как может изменяться величина ступеньки на рефлектограмме, возникшей в месте соединения волокон, при изменении длины волны (рис. 3.25).

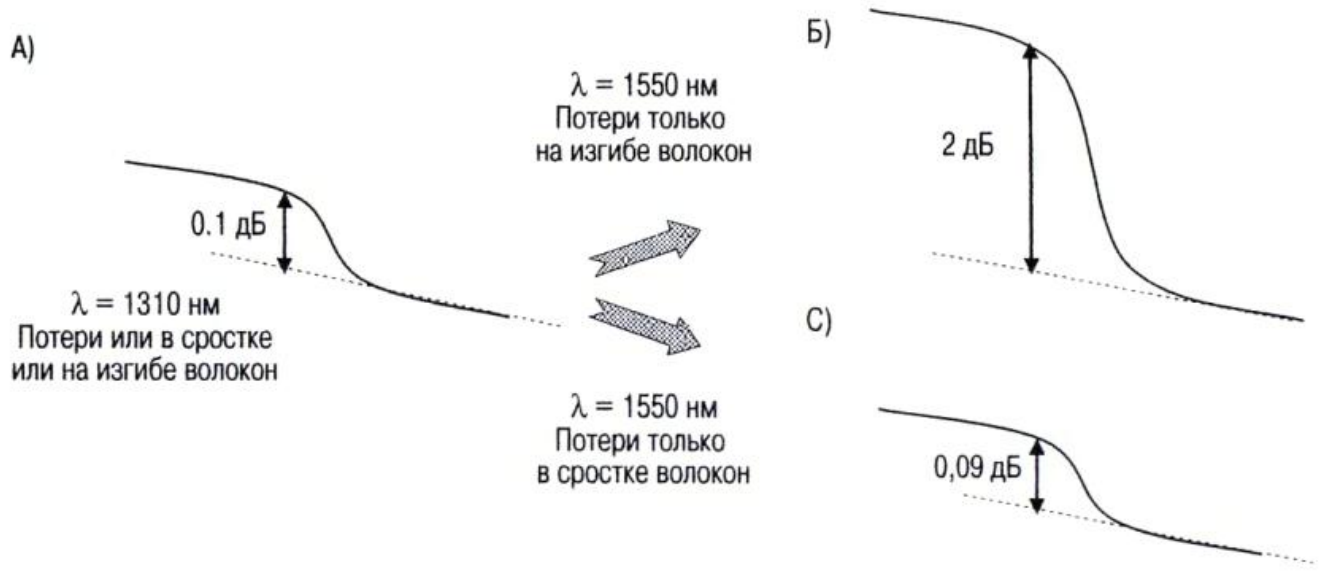


Рис. 3.25. Определение наличия сильно изогнутого участка волокна вблизи места соединения волокон. Наличие изгиба характеризуется сильным увеличением потерь при увеличении длины волны

Как показано на рис. 3.25, если ступенька (А) величиной в 0.1 дБ на λ = 1310 нм обусловлена потерями в сростке волокон (в основном из-за смещения сердцевин волокон), то тогда на длине волны 1550 нм она останется почти такой же (С). Если же ступенька (А) появилась в основном из-за потерь, вносимых при изгибе волокна, то тогда на длине волны 1550 нм ступенька (Б) существенно увеличится (до 2 дБ).

§ 13. Метод шлейфа

При сварке волокон в линии передачи необходимо убедиться, что потери в сростках волокон не превышают заданного значения. Так, например, по требованиям Ростелекома в 50 % случаев потери в сростках одномодовых волокон на λ = 1550 нм не должны превышать 0.05 дБ (таблица № 3.6).

Таблица № 3.6. Требования Ростелекома к величине потерь в сростках волокон.

Длина волны	Максимальные потери	Вероятность превышения
1550 нм	0.1 дБ	0%
1550 нм	0.05 дБ	<50%
1310 нм	0.2 дБ	0%
1310 нм	0.1 дБ	<50%

Среднее значение потерь в сростках волокон мало (~0.02 дБ) и по этому параметру они вполне удовлетворяет требованиям Ростелекома. Однако потери в сростках волокон представляют собой случайную величину, и существует вероятность, что в некоторых сростках волокон потери превысят максимальное значение, указанное в таблице №3.6. Такие сростки волокон необходимо переделывать заново, причем сделать это нужно, прежде чем они будут уложены в муфту и закопаны. В противном случае придется выкапывать и вскрывать муфту.

Таким образом, потери в сростках волокон необходимо контролировать непосредственно в процессе монтажа линии. В какой-то мере это делается с помощью измерительной системы сварочного аппарата. Однако эта система, как известно, позволяет получить только оценку величины потерь в сростках. Поэтому, для того, чтобы быть уверенным в высоком качестве сварных соединений волокон потери в них измеряются с помощью рефлектометра.

Если бы можно было ограничиться измерением потерь только с одной стороны линии, то провести такие измерения было бы достаточно просто, подключив рефлектометр к началу линии. Однако, как уже говорилось, для определения величины истинных потерь в сростках, рефлектограммы должны быть измерены с двух сторон линии.

Измерить рефлектограммы с двух сторон линии значительно сложнее даже в полностью смонтированной линии, так как второй конец линии удален от начала на большое расстояние. Практически единственной возможностью провести такие измерения по мере наращивания длины линии является использование метода шлейфа. Схема, поясняющая методику измерения потерь в сростках волокон методом шлейфа, изображена на рис. 3.26.

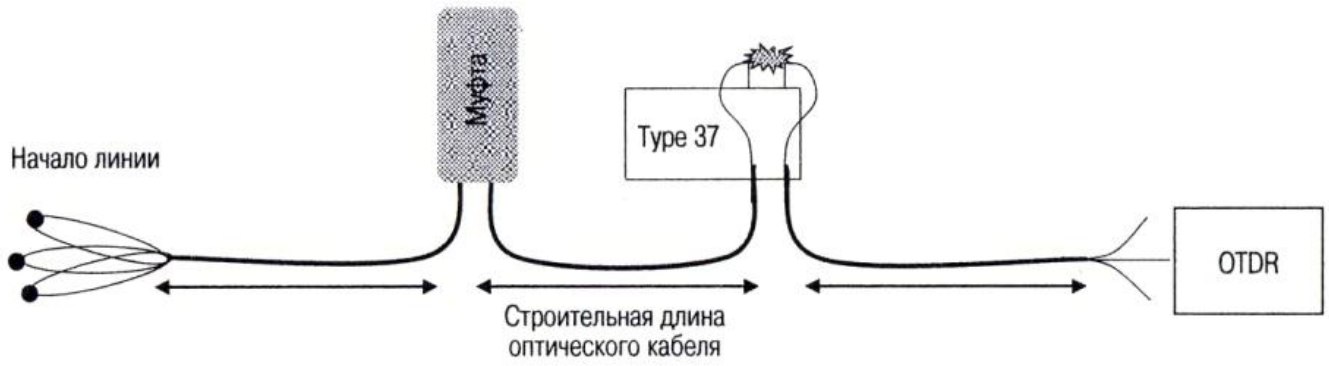


Рис. 3.26. Схема измерения потерь в сростках волокон методом шлейфа

В методе шлейфа волокна в начале линии свариваются попарно. После этого становится возможным, подключая рефлектометр только с одной стороны линии, снять рефлектограммы в двух направлениях в каждом сростке волокон. При этом рефлектометр подключается к оптическому кабелю на конце очередной его строительной длины, а волокна с другого конца этой строительной длины свариваются с волокнами уже уложенными в линию передачи. После того, как волокна сварены и их сростки уложены в муфту, с помощью рефлектометра измеряются потери в этих сростках волокон. Затем операция повторяется на следующей строительной длине оптического кабеля.

Основной недостаток метода шлейфа заключается в том, к динамическому диапазону рефлектометра предъявляются повышенные требования, так как при этом длина тестируемого участка линии фактически удваивается. Поэтому в последнее время потери в сростках волокон при монтаже линии часто контролируются только по показаниям сварочного аппарата. Такой подход стал возможен, после того как появились сварочные аппараты нового поколения, обладающие высокой точностью оценки величины потерь в сростках волокон.

Так, например, последняя модель сварочного аппарата Sumitomo TYPE-37 позволяет сваривать SM волокна со средними потерями 0.02 дБ, а величина потерь оценивается этим

аппаратом с точностью 0.02 дБ. Этого, в принципе, достаточно, чтобы с большой вероятностью удовлетворить требованиям Ростелекома (см. таблицу №3.6).

Как показывает опыт, если по оценке такого сварочного аппарата потери в сростках волокон не превышают 0.02 дБ, то в 98 % сростках волокон истинные потери не превышают 0.05 дБ и только для 0.5 % таких сростков исгинные потери превышают 0.1 дБ. Поэтому переделывать приходится не более одной муфты из десяти, что в общем проще и быстрее, чем организовывать вторую бригаду для того, чтобы контролировать потери в процессе сварки волокон методом шлейфа.

§ 14. Применение согласующего кабеля

Оптический разъем – единственный оптический элемент рефлектометра, к которому имеется непосредственный доступ. Если оптический разъем рефлектометра поврежден или к нему подсоединено волокно с некачественным оптическим разъемом, то это может привести к уменьшению мощности света вводимой в волокно и к увеличению ширины мертвой зоны (рис. 3.27).

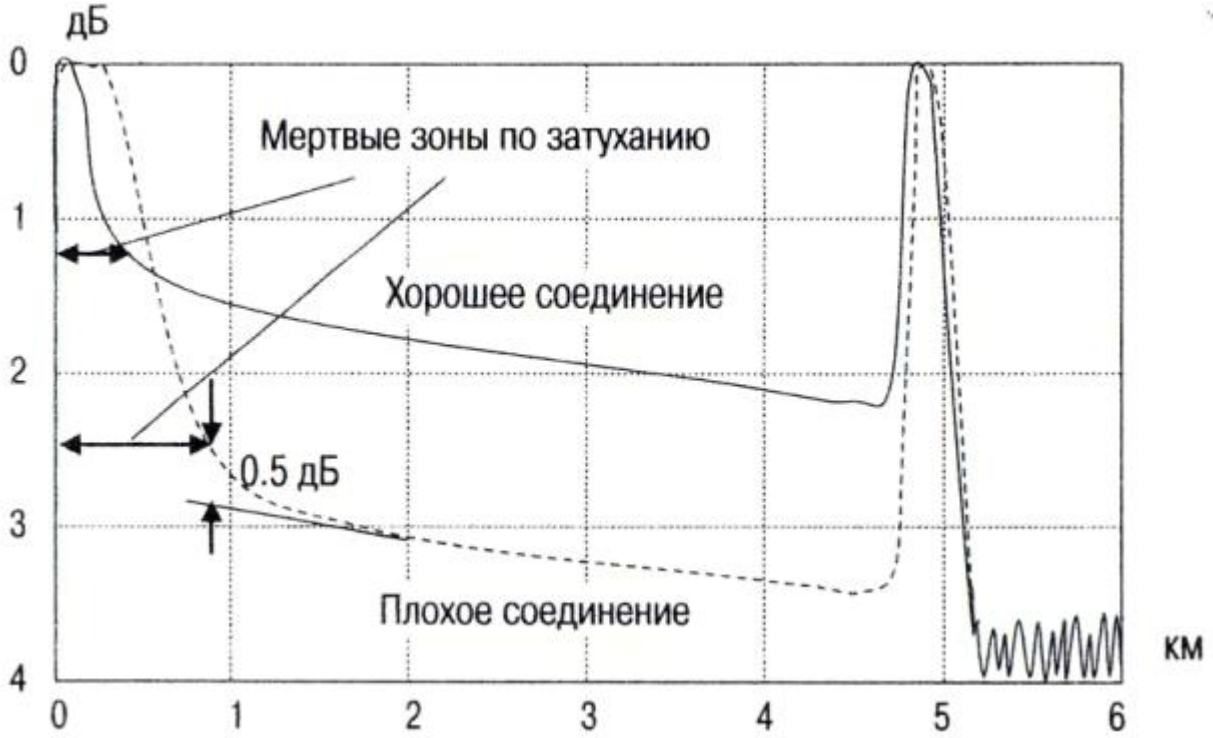


Рис. 3.27. Рефлектограммы, полученные при хорошем и плохом качестве подключения к оптическому разъему рефлектометра (без согласующего кабеля)

Поэтому к сохранности оптического разъема рефлектометра уделяют особое внимание. Так, например, категорически запрещено вводить в него иммерсионную жидкость. Детали разъема должны содержаться в чистоте и периодически протираться изопропиловым спиртом. Для того, чтобы предохранить оптический разъем рефлектометра от повреждений его обычно подсоединяют к оптическим волокнам с помощью оптического шнура (отрезка одномодового волокна снабженного на концах оптическими разъемами). В этом случае основная нагрузка, при многократных подключениях рефлектометра, приходится на разъем в оптическом шнуре. Если он повредится, то можно просто взять другой оптический шнур. При этом допускается (для уменьшения отражения) вводить иммерсионную жидкость в место соединения оптического шнура с волокном.

Длина оптического шнура обычно составляет несколько метров, т.е. она значительно меньше ширины мертвой зоны на входе в рефлектометр. Поэтому если качество соединения оптических волокон с рефлектометром получается плохим, то по рефлектограмме трудно определить конкретное место повреждения. Так, например, всплеск сигнала в начале рефлектограммы может быть вызван как отражением от места соединение оптических

разъемов рефлектометра и оптического шнура, так и отражением от места соединения оптических разъемов исследуемого волокна и оптического шнура.

Для того, чтобы можно было локализовать место повреждения, длина оптического шнура должна быть больше ширины мертвой зоны на входе в рефлектометр. Для этих целей обычно используют уложенный в бухту оптический шнур длиной около 1 км. Чаще всего его устанавливают на входе в линию, и тогда он называется согласующим кабелем (launch cable). Если же он устанавливается на выходе линии, то его называют приемным кабелем (receive cable). В соответствии с требованиями руководства по строительству линий передачи, согласующий кабель должен применяться практически на всех этапах монтажа линии.

Рефлекгограмма отрезка волокна с согласующим кабелем на входе и приемным кабелем на выходе приведена на рис. 3.28. На рефлектограмме виден всплеск сигнала, вызванный отражением от места соединения оптических разъемов согласующего кабеля и исследуемого волокна. До и после этого всплеска сигнала видны наклонные участки, обусловленные релеевским рассеянием света в волокне.

Как известно, величина потерь в месте соединения оптических разъемов равна расстоянию между прямыми линиями, проведенными через эти наклонные участки рефлектограммы. Таким образом, при использовании согласующего кабеля можно измерить величину потерь в месте соединения оптических разъемов согласующего кабеля и исследуемого волокна и проконтролировать качество этого соединения.

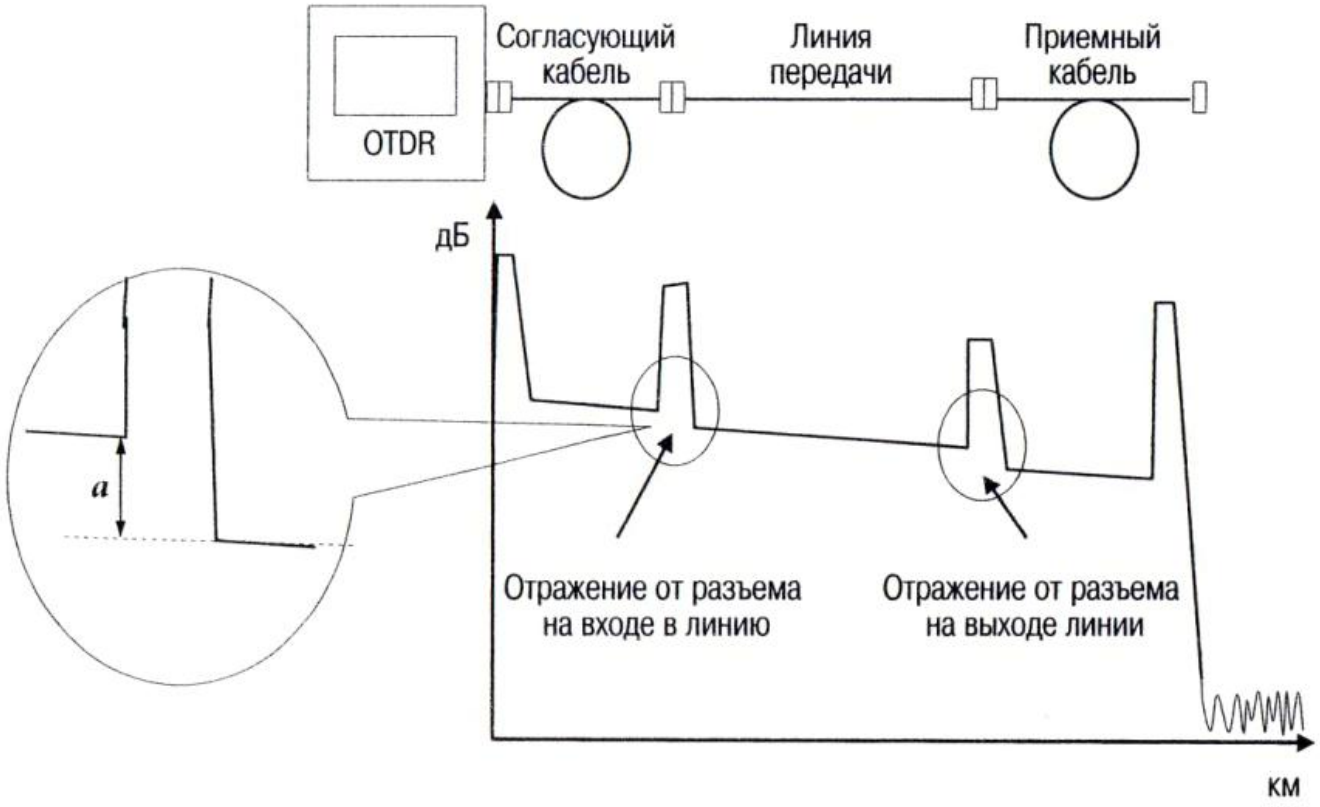


Рис. 3.28. Рефлектограмма трассы с согласующим и приемным кабелем

В тоже время измерить величину потерь в месте соединения оптических разъемов согласующего кабеля и рефлектометра по-прежнему нельзя. Из рис. 3.28 видно, что всплеск сигнала, вызванный отражением от места соединения этих разъемов, примыкает непосредственно к началу рефлектограммы и рядом с ним имеется только один наклонный участки рефлектограммы. Поэтому о качестве соединения оптических разъемов согласующего кабеля и рефлектометра можно судить только по ширине мертвой зоны на входе в рефлектометр – она должна быть близка к значению, специфицированному для данного типа рефлектометра.

Если на конце линии установлен приемный кабель, то, как видно из рис. 3.28, можно измерить величину потерь в месте соединения оптических разъемов приемного кабеля и тестируемого волокна. Более того, если линия достаточно длинная, то пик отражения от места соединения этих разъемов не насыщается и по его величине можно оценить величину коэффициента отражения от этих разъемов.

Иногда согласующий кабель подключают к линии, сваривая волокна. Делают это для того, чтобы уменьшить ширину мертвой зоны на входе в линию. Ширина мертвой зоны, образующаяся при сварном соединении волокон, примерно равна ширине импульса света в волокне, а ширина мертвой зоны, образующаяся при соединении волокон с помощью оптических разъемов обычно почти на порядок больше (она зависит от величины коэффициента отражения света в месте соединения этих разъемов).

При измерении потерь в многомодовых оптических волокнах также используется согласующий кабель, но из многомодового волокна длиной 0.5...1 км. Его обычно называют нормализующей катушкой. Как известно в многомодовых волокнах, в отличие от одномодовых волокон, потери света в волокне зависит от условия возбуждения мод (потери увеличиваются с увеличением номера моды). Поэтому для корректного измерения величины потерь необходимо обеспечить равномерное заполнение светом всех мод волокна. Проще всего это сделать, пропустив предварительно свет через достаточно длинный отрезок многомодового волокна (нормализующую катушку).

Раздел III.

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ

§ 15. Методика измерения коэффициента отражения

Коэффициент отражения ($R = P_{от}/P_o$) определяется как отношение мощности волны отраженной от неоднородности $P_{от}$ к мощности падающей волны P_o. В единицах децибел выражение для коэффициента отражения записывается в виде:

$$\boldsymbol{r} = 10\log(P_{от}/P_o) \qquad (3.12)$$

Обычная процедура нахождения коэффициента отражения заключается в измерении относительной величины отраженной мощности ($P_{от}/P_o$) (рис. 3.29).

Рис. 3.29. Для нахождения величины коэффициента отражения необходимо выполнить два измерения

Однако с помощью рефлектометра нельзя измерить мощность падающей на неоднородность волны P_o, но можно найти величину всплеска сигнала отражения (рис. 3.30)

$$f = 5\log\left(\frac{P_{от} + P_{рас}}{P_{рас}}\right) = 5\log\left(\frac{R+Q}{Q}\right). \qquad (3.13)$$

Как видно из (3.13), величина всплеска сигнала ***f*** однозначно определяется величиной отношения $P_{от}/P_{рас} = R/Q$, где $Q = P_{рас}/P_o$ – коэффициент обратного релеевского рассеяния. Потенцируя (3.13), получаем выражение для коэффициента отражения: $R = \left(10^{f/5} - 1\right)Q$.В единицах децибел оно принимает вид:

$$r = 10\log\left(10^{f/5} - 1\right) + q. \qquad (3.14)$$

Таким образом, для нахождения коэффициента отражения с помощью рефлектометра достаточно одного измерения (величины всплеска сигнала ***f***), но при этом необходимо знать величину коэффициента обратного релеевского рассеяния ***q*** = 10 log Q.

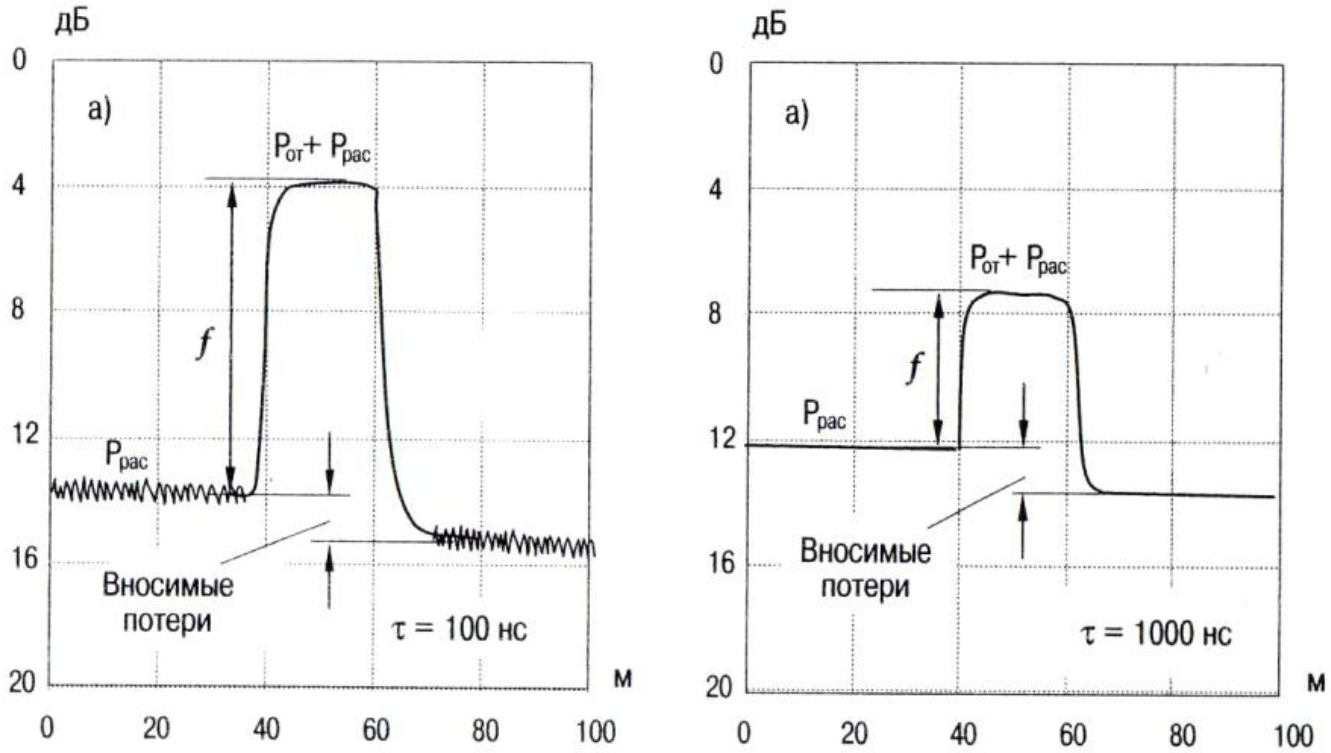


Рис. 3.30. Рефлектограммы участка линии с оптическим разъемом.
*Коэффициент отражения **r** = –40 дБ, длительность импульса (**а**) 100 нс, (**б**) 1000 нс*

В общем случае, как видно из (3.14), коэффициент отражения ***r*** и высота всплеска сигнала на рефлектограмме ***f*** связаны между собой довольно громоздким нелинейным выражением. Однако во многих практически интересных случаях всплеск сигнала получается достаточно большим так, что выполняется условие: ***f*** > 5 дБ. В этом приближении выражение (3.14) упрощается:

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{q} + 2\boldsymbol{f}. \qquad (3.15)$$

Его можно получить непосредственно из (3.13), положив, что R >> Q. Тогда выражение для всплеска сигнала преобразуется к виду $f \cong 5\log\left(\frac{R}{Q}\right) = \frac{r-q}{2}$, что эквивалентно (3.15). Приближенное выражение (3.15) имеет простой физический смысл. Оно означает, что разность между отраженной и рассеянной мощностью (в единицах дБм) равна удвоенной величине всплеска сигнала (удвоенной потому, что на вертикальной шкале рефлектометра откладывается 5 log, а не 10 log).

Коэффициент обратного релеевского рассеяния определяется, как доля мощности прямой волны рассеянной назад в основную моду волокна с участка длиной, равной полуширине импульса света в волокне: $Q = S\alpha_p v\frac{\tau}{2}$, где $S \approx 1.2\times10^{-3}$ – коэффициент захвата рассеянного излучения модой волокна, $\alpha_p = 3.9\times10^{-2}$ км$^{-1}$ (0.17 дБ/км) – коэффициент потерь света в SM волокне из-за релеевского рассеяния на $\lambda = 1550$ нм, $v = c/n_\Gamma \approx 2105$ км/с – групповая скорость света в волокне, τ – длительность импульса.

При длительности импульса 1 нс коэффициент обратного релеевского рассеяния равен примерно –78 дБ на $\lambda = 1310$ нм и –82 дБ на $\lambda = 1550$ нм. Для волокон разных производителей этот коэффициент может отличаться на 2 дБ, (см. таблицу № 3.7).

Таблица № 3.7. Коэффициенты обратного релеевского рассеяния для SM волокон.

Параметр	Alcatel	Corning	OFS
Коэффициент обратного релеевского рассеяния на λ = 1310/1550 нм, при τ = 1 нс	–76.7 / –81.7	–77 / –82	–79.6 / –82.1

В дальнейшем при оценках для обеих длин волн мы будем полагать коэффициент обратного релеевского рассеяния равным –80 дБ (при $\tau = 1$ нс). Тогда зависимость коэффициента обратного релеевского рассеяния от длительности импульсов τ можно записать в виде:

$$q = -80 \text{ дБ} + 10 \log\left(\frac{\tau[\text{нс}]}{1[\text{нс}]}\right). \qquad (3.16)$$

Другой удобной для запоминания величиной является коэффициент обратного релеевского рассеяния с единицы длины волокна: $\frac{Q}{L} = S\alpha_p = -70\frac{\text{дБ}}{\text{м}}$. Зависимость коэффициента обратного релеевского рассеяния от длительности импульсов изображена на рис. 3.31. Для сравнения на этом же рисунке приведены значения коэффициентов отражения от Super PC разъемов (***r*** = –40 дБ) и Angled PC разъемов (***r*** = –60 дБ). Коэффициент обратного релеевского рассеяния сравнивается с коэффициентом отражения от Angled PC разъемов при $\tau \sim 100$ нс, с коэффициентом отражения от Super PC разъемов при $\tau \sim 10$ мкс.

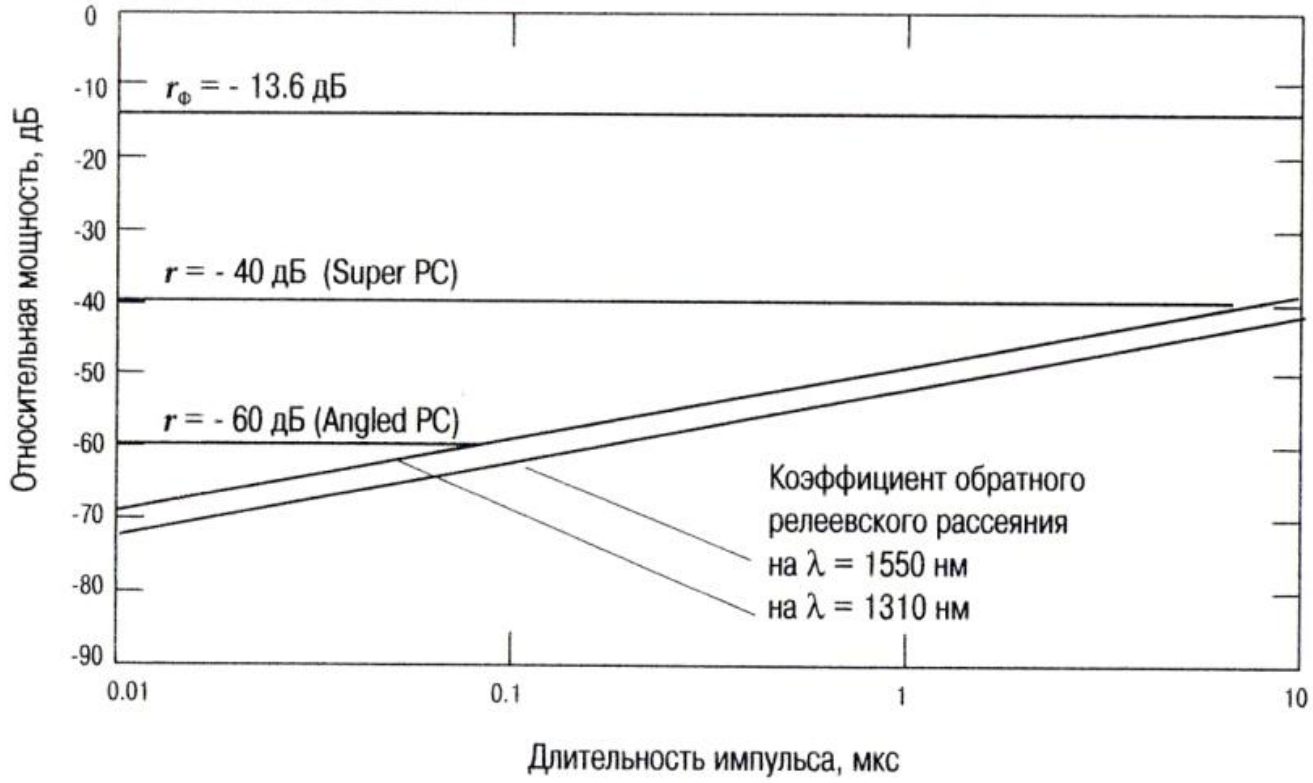


Рис. 3.31. Зависимость доли отраженной и рассеянной в волокне мощности света от длительности импульсов

Используя диаграммы (рис. 3.31), с помощью выражения (3.15) можно оценить величину всплеска сигнала ***f***. Так, например, для Super PC разъемов разность ***r*** – ***q*** при $\tau \sim 1$ мкс равна 10 дБ и, соответственно, высота всплеска ***f*** должна быть равна 5 дБ. Или, наоборот, по величине всплеска на рефлектограмме можно определить величину коэффициента отражения. Например, величина всплеска на рис. 3.30а равна 10 дБ (при $\tau \sim 100$ нс) и, соответственно, разность ***r*** – ***q*** равна 20 дБ. А так как при $\tau \sim 100$ нс коэффициент обратного релеевского рассеяния ***q*** = –60 дБ (рис. 3.31), то получаем, что ***r*** = –40 дБ.

Приближенное выражение (3.15) применимо при $f > 5$ дБ. При меньших значениях зависимость r от f становится нелинейной. В этом случае для оценок нужно использовать выражение (3.14) или графики, приведенные на рис. 3.32.

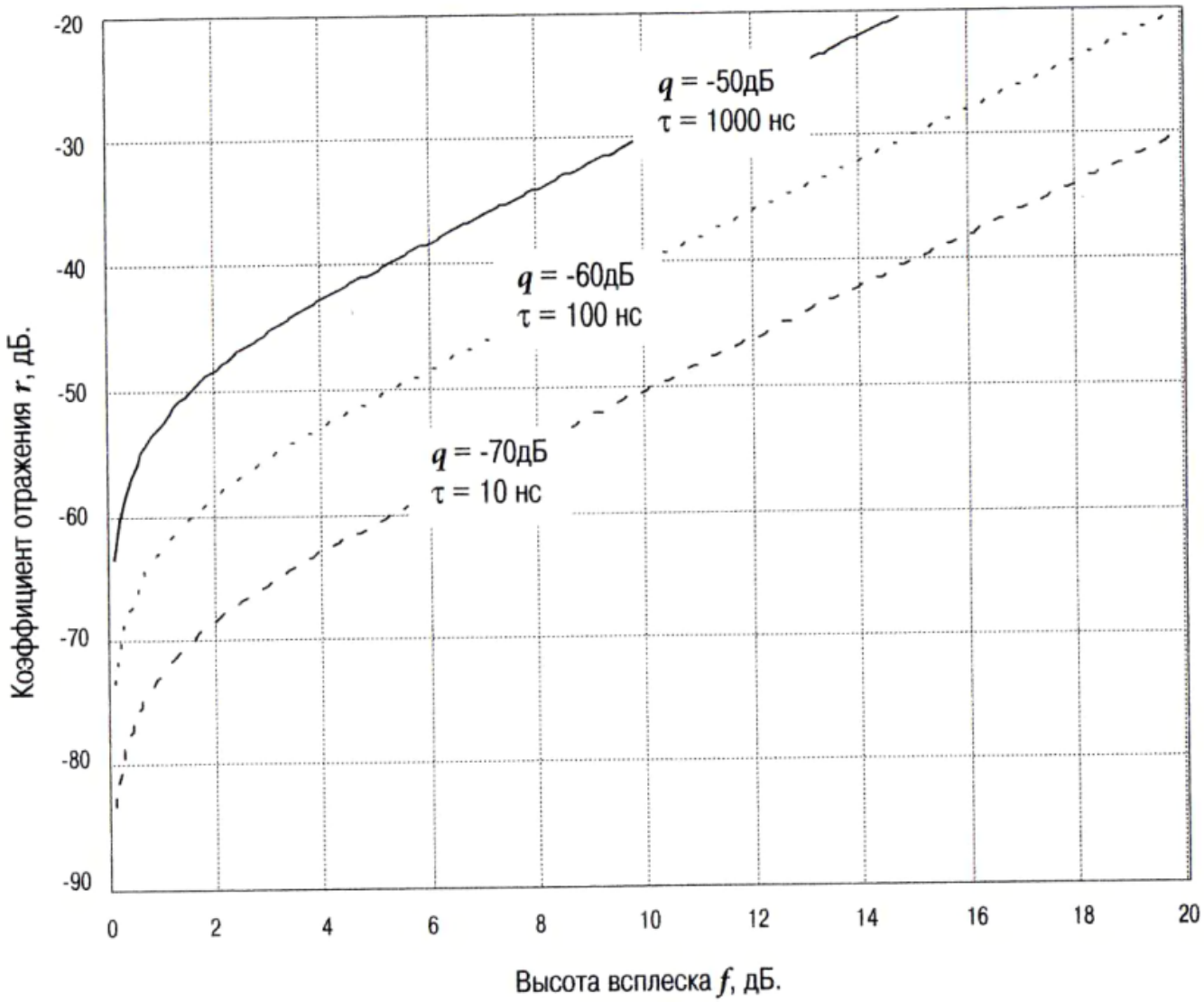


Рис. 3.32. Зависимость коэффициента отражения r от высоты всплеска на рефлектограмме

Как видно из рис. 3.32, при $f < 5$ дБ и $r < -60$ дБ высота всплеска сигнала f быстро уменьшается с увеличением длительности импульса. Например, для того, чтобы обнаружить сварное соединение волокон с коэффициентом отражения $r = -70$ дБ, ширина импульса должна быть менее 100 нс, а при коэффициенте отражения $r = -80$ дБ – менее 10 нс.

§ 16. Ошибки измерений

Ошибка в измерении коэффициента отражения Δr, как видно из (3.14), складывается из ошибки в измерении коэффициента обратного релеевского рассеяния и ошибки в измерении величины всплеска сигнала. Оценим величину Δr в предположении, что всплеск сигнала f меньше уровня насыщения, но больше 5 дБ. В этом приближении коэффициент отражения r связан с высотой всплеска сигнала простым соотношением (3.15): $r = q + 2f$.

Величина коэффициента обратного релеевского рассеяния специфицируется производителем волокон (см. Таб. №3.7) с точностью $\Delta q \sim 0.1$ дБ. Ошибка в измерении величины всплеска сигнала, учитывая, что при $f > 5$ дБ вклад шумов рефлектограммы мал, возникает, в основном, из-за нелинейности вертикальной шкалы рефлектометра: $\Delta f = Kf$. При $f = 10$ дБ (рис. 3.30а) и типичном значении $K = 0.02$ дБ/дБ получаем, что $\Delta f = 0.2$ дБ и, соответственно, $\Delta r \approx 0.5$ дБ.

Кроме рассмотренных выше инструментальных ошибок существуют также ещё и систематические ошибки, обусловленные относительно большой величиной всплеска сигнала. Как известно, отражение света от оптического разъема рефлектометра приводит обычно к насыщению фотоприемника. При этом чувствительность фотоприемника уменьшается, а нелинейность отклика увеличивается. Чтобы предотвратить перегрузку измерительной системы рефлектометра слишком большим входным сигналом, уровень входного сигнала ограничивают (рис. 3.33). Если входной сигнал превышает этот уровень (clipped level), то измерительная система рефлектометра не реагирует на изменение входного сигнала и возникает зона нечувствительности или, иначе, мертвая зона.

К насыщению фотоприемника может привести не только отражение света от оптического разъема рефлектометра, но и от любой достаточно сильно отражающей неоднородности, не слишком далеко удаленной от начала волокна. В этом случае измеренное значение высоты всплеска сигнала отражения будет занижено. Для того, чтобы исключить эту ошибку, достаточно внести дополнительные потери, изогнув волокно на начальном участке линии как это показано на рис. 3.33 б.

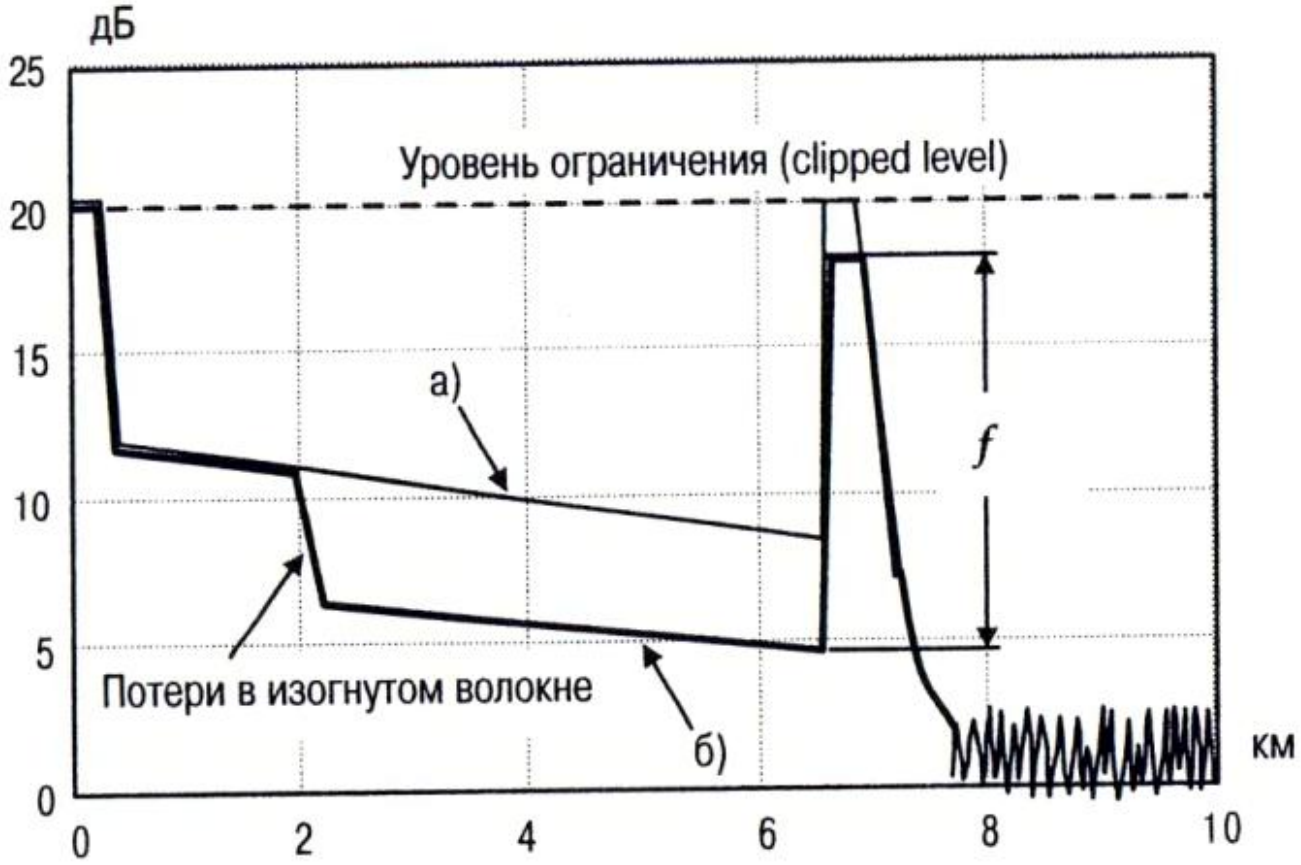


Рис. 3.33. Рефлектограммы отрезка волокна
а) Сигнал отражения от торца волокна ограничен из-за насыщения фотоприемника
б) Сигнал отражения от торца волокна ниже уровня насыщения фотоприемника

Ещё одна ошибка возникает, при большом уровне отраженного сигнала, из-за переотражений импульсов света в волокне. Импульсы света, возвращающиеся обратно в рефлектометр, частично отражаются от оптического разъема рефлектометра и поступают вновь на вход линии. Таким образом, кроме импульсов приходящих непосредственно от источника излучения на вход линии приходят также и переотраженые импульсы, запаздывающие на время равное времени распространения импульсов до места их отражения в линии и обратно.

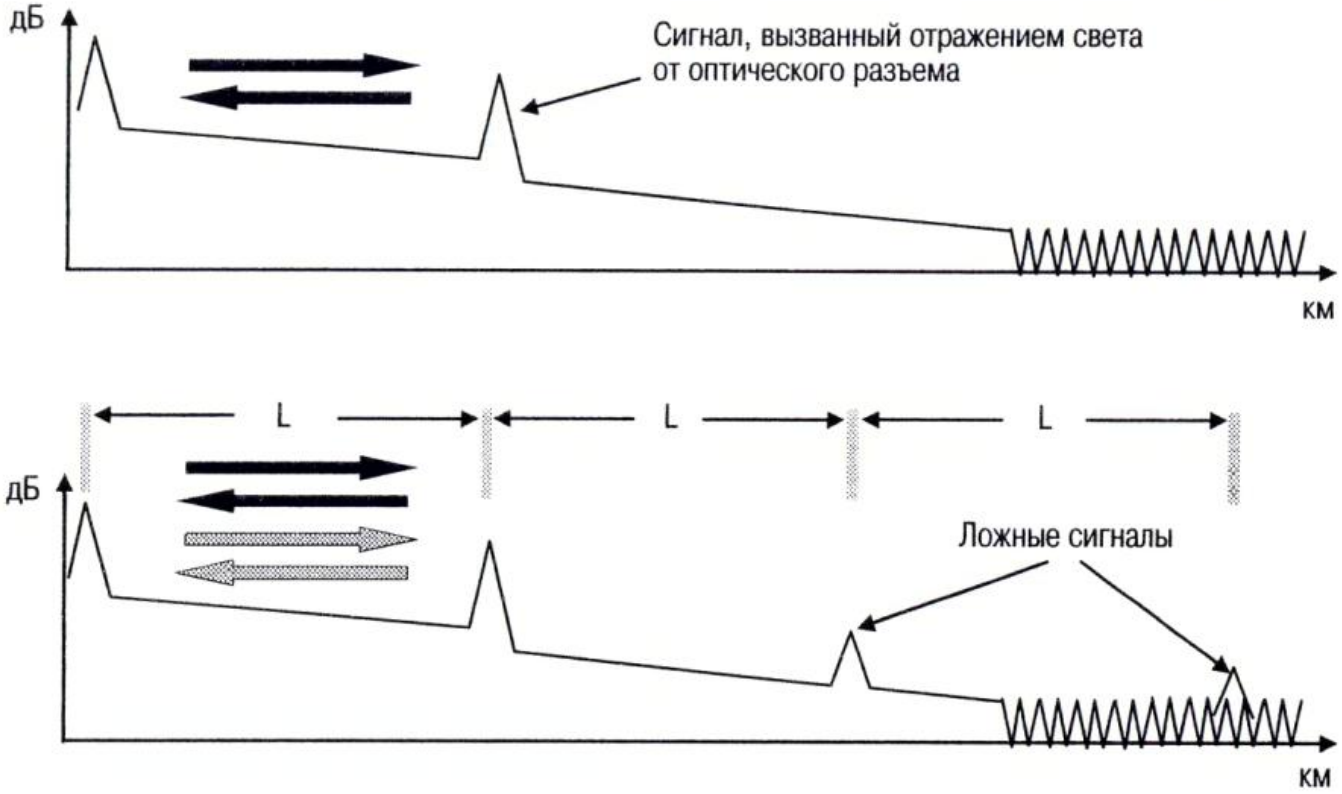


Рис. 3.34. Ложные сигналы, возникающие на рефлектограмме линии с сильно отражающей неоднородностью
а) Мощность переотраженных импульсов мала
б) Переотраженные импульсы проявляются на рефлектограмме в виде ложных всплесков сигнала

Всплески ложных сигналов можно отличить от всплеска вызванного отражением импульса от неоднородности по двум признакам. Во-первых, ложные сигналы появляются на расстоянии, кратном расстоянию до отражающей неоднородности. Во-вторых, между наклонными прямыми линиями сигнала обратного рассеяния до и после ложного всплеска отсутствует ступенька, вызванная потерями света в этой неоднородности.

Возможность измерения малых коэффициентов отражения ограничивается малой величиной всплеска сигнала. Как показано на рис. 3.31, при увеличении длительности импульса величина коэффициента отражения $\boldsymbol{r}$ от оптических РС разъемов сравнивается с величиной коэффициента обратного релеевского рассеяния света волокне $\boldsymbol{q}$, а величина всплеска сигнала стремится при этом к нулю. Для того, чтобы увеличить высоту всплеска сигнала необходимо уменьшать длительность импульсов, что приводит к искажению формы всплеска сигнала и, в частности, к уменьшению его величины.

Всплеск сигнала, возникающий при отражении света от точечной неоднородности, совпадает по форме с осциллограммой импульса (в логарифмическом масштабе) на выходе фотоприемника. Искажение формы импульса становится заметной, когда длительность импульса τ становится сравнимой с $1/\Delta f$, где Δf – ширина полосы фотоприемника.

Изменение формы импульса, из-за конечной ширины полосы фотоприемника, показано (в линейном масштабе) на рис. 3.35. На входе в фотоприемник форма импульса практически прямоугольная (рис. 3.35 а). На выходе фотоприемника передний фронт импульса экспоненциально возрастает, а задний фронт экспоненциально спадает во времени (рис. 3.35 б). Своего максимального значения равного $V_o\left(1-\exp\left(-2\pi t\Delta f\right)\right)$ импульс достигает в момент, когда на фотоприемник приходит задний фронт импульса.

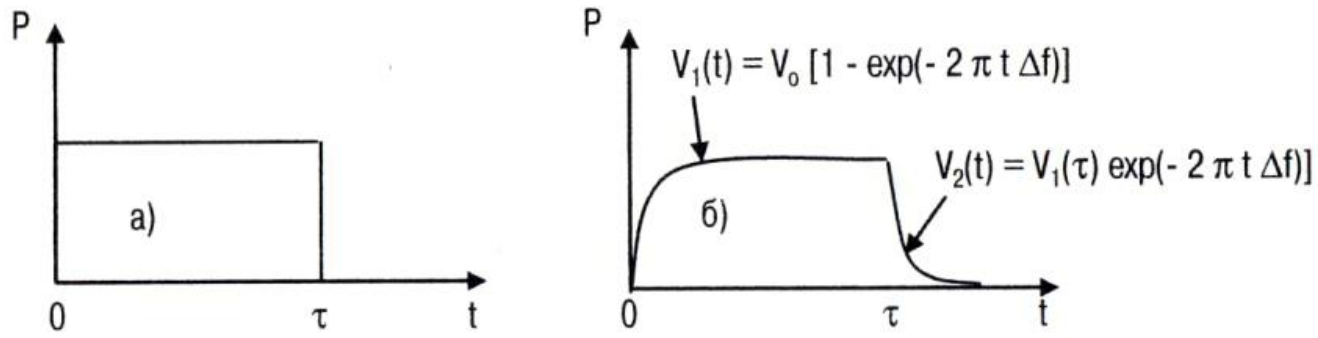


Рис. 3.35. Форма импульсов в линейном масштабе (а) на входе в фотоприемник, (б) на выходе фотоприемника

При сужении полосы фотоприемника от ∞ до Δf амплитуда импульса на выходе фотоприемника уменьшается от V_o до $V_o[1 - \exp(-2\pi\tau\Delta f)]$. Это уменьшение амплитуды импульса приводит к кажущемуся уменьшению коэффициента отражения ***r*** на величину

$$\Delta r = -10\log\left(1-\exp\left(-2\pi\tau\Delta f\right)\right). \qquad (3.17)$$

При сужении полосы фотоприемника изменяется не только амплитуда, но и форма импульса. Зависимость формы всплеска сигнала от ширины полосы фотоприемника при отражении импульса длительностью 30 нс от оптического разъема с коэффициентом отражения ***r*** = –40 дБ показана на рис. 3.36.

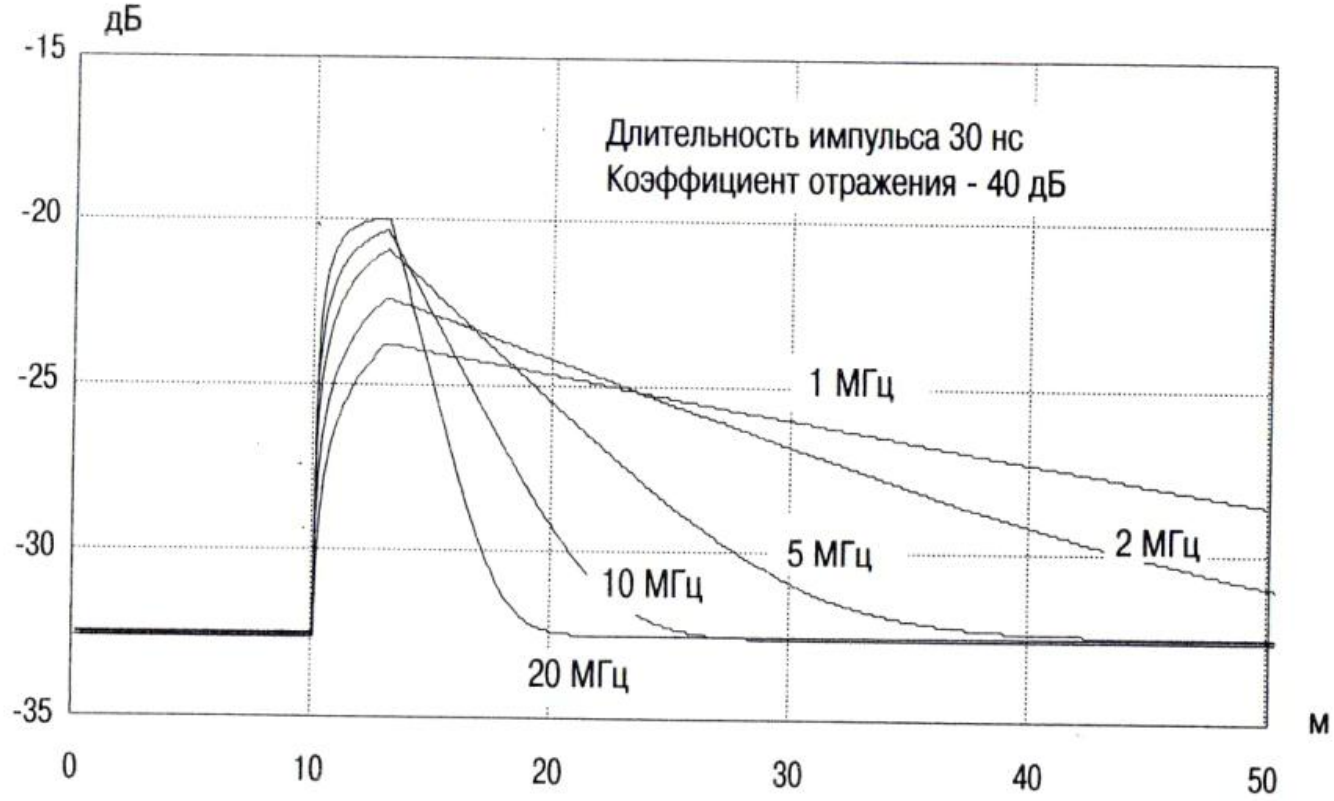


*Рис. 3.36. Влияние ширины полосы фотоприемника на высоту всплеска сигнала отражения от оптического разъема с коэффициентом отражения **r** = –40 дБ при длительности импульса 30 нс.*

Своего максимального значения, как видно из рис. 3.36, импульсы достигают на расстоянии, равном ширине импульса света в волокне (3 м при τ = 30 нс). Причем передний фронт импульсов крутой, а задний фронт пологий. Длительность переднего фронта импульса ограничена шириной импульса света в волокне, а длительность заднего фронта неограниченно увеличивается при сужении полосы фотоприемника. Для логарифмического масштаба характерно, что в задний фронт импульса уменьшается по линейному закону (в

начале, когда вклад от сигнала релеевского рассеяния мал). Для сравнения в линейном масштабе (рис. 3.35) амплитуда заднего фронта импульса уменьшается по экспоненциальному закону.

Всплески сигнала отражения на рис. 3.36 получены при одном и том же значении коэффициента отражения r и коэффициента обратного релеевского рассеяния q. Но величины всплеска сигнала при разных значениях ширины полосы фотоприемника получаются разными. Так, например, при $\Delta f = 20$ МГц амплитуда всплеска сигнала равна $f \approx 12.5$ дБ, а при $\Delta f = 1$ МГц она уменьшается до величины $f \approx 8.7$ дБ. Это уменьшение высоты всплеска следует отнести на счет кажущегося уменьшения коэффициента отражения. С помощью (3.17) находим величину поправки: $\Delta r = 0.1$ дБ (при $\Delta f = 20$ МГц и $\tau = 30$ нс) и $\Delta r = 7.65$ дБ (при $\Delta f = 1$ МГц и $\tau = 30$ нс).

Оценим величину коэффициента отражения r с помощью приближенного выражения (3.15): $r = q + 2f$. При длительности импульса 30 нс величина коэффициента обратного релеевского рассеяния (см. (3.16)) равна –65 дБ. При $\Delta f = 20$ МГц величина всплеска $f = 12.5$ дБ, а $2f = 25$ дБ. С помощью приближенного выражения (3.15) находим, что $r = -40$ дБ. С учетом поправки $\Delta r = 0.1$ дБ получаем окончательное значение: $r = -39.9$ дБ.

При $\Delta f = 1$ МГц величина всплеска $f = 8.7$ дБ, а $2f = 17.4$ дБ. С помощью приближенного выражения (3.15) находим, что $r = -47.6$ дБ. С учетом поправки $\Delta r = 7.65$ дБ получаем окончательно значение: $r = -39.95$ дБ. Таким образом, после введения соответствующей поправки, результаты измерений коэффициента отражения при разных значениях ширины полосы фотоприемника совпали между собой (в пределах точности измерений).

Для того, чтобы ввести корректирующую поправку Δr необходимо знать, как видно из (3.17), длительность импульса τ и ширину полосы фотоприемника Δf. Значение длительности импульсов обычно известно, так как оно указывается на рефлектограмме, а ширина полосы фотоприемника обычно неизвестна.

Ширину полосы фотоприемника можно оценить, например, следующим образом. Для этого надо измерить величину коэффициента отражения при двух значения длительности импульса. При большой длительности (когда форма всплеска сигнала близка к прямоугольной) будет измерено истинное значение коэффициента отражения. При малой длительности импульса измеренное значение коэффициента отражения получится меньше истинного на величину Δr. Далее, зная величину Δr и длительность импульса τ, с помощью (3.17) рассчитывается величина Δf.

§ 17. Измерение обратных потерь (ORL)

Хорошо известно, что даже небольшая часть волны вернувшаяся обратно в лазерный диод ухудшает стабильность системы передачи. Наиболее сильно обратная волна влияет на работу аналоговых систем кабельного телевидения. Обратная волна в волокне образуется как за счет рассеяния, так и за счет отражения света. В кварцевом волокне свет рассеивается равномерно со всех участков волокна, а отражается только в местах нарушения однородности волокна (чаще всего в оптических разъемах).

Мощность, отраженная от удаленной неоднородности в длинном волокне, как правило, меньше мощности рассеянной назад во всем волокне, но она, оказывает значительно более сильное воздействие на лазерный диод. Обусловлено это тем, что участок волокна, расположенный между отражающей неоднородностью (например, оптическим разъемом) и лазерным диодом, образует дополнительный резонатор, связанный оптически с основным резонатором лазерного диода. Оптическая длина этого резонатора изменяется под действием окружающей среды, что приводит к флуктуациям мощности, частоты и длины когерентности излучения лазерного диода.

Долю мощности, вернувшейся обратно к источнику излучения, принято характеризовать величиной обратных потерь (optical return loss):

$$ORL = 10\log\left(\frac{P_o}{P_{об}}\right), \qquad (3.18)$$

где P_o – мощность введенная в волокно, $P_{об}$ – вернувшаяся обратно мощность. Запишем (3.18) в единицах дБм ($p = 10\log\left(\frac{P}{1[\text{мВт}]}\right)$)

$$\boldsymbol{ORL} = \boldsymbol{p}_o - \boldsymbol{p}_{об} \tag{3.19}$$

Отсюда видно, что ***ORL*** имеет смысл потерь на преобразование мощности введенной в волокно в мощность волны вернувшейся обратно к источнику излучения.

Величиной ***ORL*** можно характеризовать как отдельную неоднородность (например, оптический разъем), так и весь регенерационный участок линии передачи. Для отдельной неоднородности, как видно из сравнения выражений (3.12) и (3.18), ***ORL*** отличается от коэффициента отражения только знаком (***ORL*** = –***r***). Поэтому качество оптического разъема с равным успехом можно характеризовать как величиной коэффициента отражения, так и величиной ***ORL***.

В тоже время понятие коэффициента отражения нельзя использовать для характеристики доли мощности, вернувшейся обратно с участка линии передачи, так как оно определено только для отдельной (локальной) неоднородности. Мощность же вернувшаяся с участка линии складывается как из мощности рассеянной в волокне, так и мощности отраженной от нескольких неоднородностей линии. Отражательную способность такой распределенной системы принято характеризовать величиной ***ORL***.

В качестве примера найдем величину ***ORL*** для отрезка волокна длиной L. Схема измерений изображена на рис 3.37. Катушка волокна подключается одним концом к рефлектометру. Волокно на другом конце катушке сколото так, что коэффициент от него близок к френелевскому ($\boldsymbol{r}_т$ = –13.6 дБ). На конце волокна может быть сделана петелька (радиусом ~1 см) или он может быть погружен в иммерсию, что позволяет уменьшить коэффициент отражения практически до нуля.

Рис. 3.37. Схема эксперимента по определению зависимости ORL от длины волокна L и коэффициента отражения от торца волокна RT

Мощность волны, вернувшейся в рефлектометр, складывается из мощности рассеянной назад в моду волокна и мощности отраженной от торца волокна $P_{об}(L) = P_o\left(S\alpha_p L_{эфф} + R_т \exp(-2\alpha L)\right)$, где $L_{эфф} = \frac{1-\exp(-2\alpha L)}{2\alpha}$ – эффективная длина участка волокна, с которого приходит рассеянная назад мощность (она ограничена из-за потерь света в волокне). При $\alpha L << 1$ эффективная длина $L_{эфф} = L$, а при $a L >> 1$ она не зависит от L и определяется только величиной потерь в волокне ($L_{эфф} = 1/(2\alpha)$) Подставив выражение для $P_{об}(L)$ в (3.18) найдем ***ORL*** для отрезка волокна:

$$\boldsymbol{ORL} = -10\log(S\times\alpha_p\times L_{эфф} + R_т\times\exp(-2\alpha L)). \tag{3.20}$$

Выражение для ***ORL*** содержит два члена. Первый член учитывает мощность света, рассеянную в волокне. Второй член учитывает мощность, отраженную от торца волокна. Эта мощность пропорциональна коэффициенту отражения от торца волокна $R_т$ и экспоненциально уменьшается с увеличением длины L волокна. Двойка перед коэффициентом

поглощения α в показателе экспоненты появилась из-за того, что свет проходит через волокно дважды.

В длинном волокне ($\alpha L >> 1$) обратные потери, как видно из (3.20), не зависят от длины волокна и коэффициента отражения от торца волокна: $\boldsymbol{ORL}_р = -10\log(S\times\alpha_р/(2\alpha))$. Оценим величину $\boldsymbol{ORL}_р$ на $\lambda = 1550$ нм. Коэффициент рассеяния с единицы длины волокна $S\alpha_р = Q/L = 5\times10^{-8}$ 1/м. Для типичной величины потерь $\boldsymbol{a} = 0.20$ дБ/км, учитывая, что $\boldsymbol{a}L = -10\log e^{-\alpha L}$, находим: $\alpha = \dfrac{0.20}{10\log e} = \dfrac{0.20}{4.34} = 0.20\cdot 0.23 = 0.046$ км$^{-1}$,

$L_{эфф} = \dfrac{1}{2\alpha} \cong 10$ км и $\boldsymbol{ORL}_р = 33$ дБ.

В коротком волокне ($\alpha L << 1$) величина ORL зависит и от длины волокна и от коэффициента отражения от торца волокна (рис. 3.38).

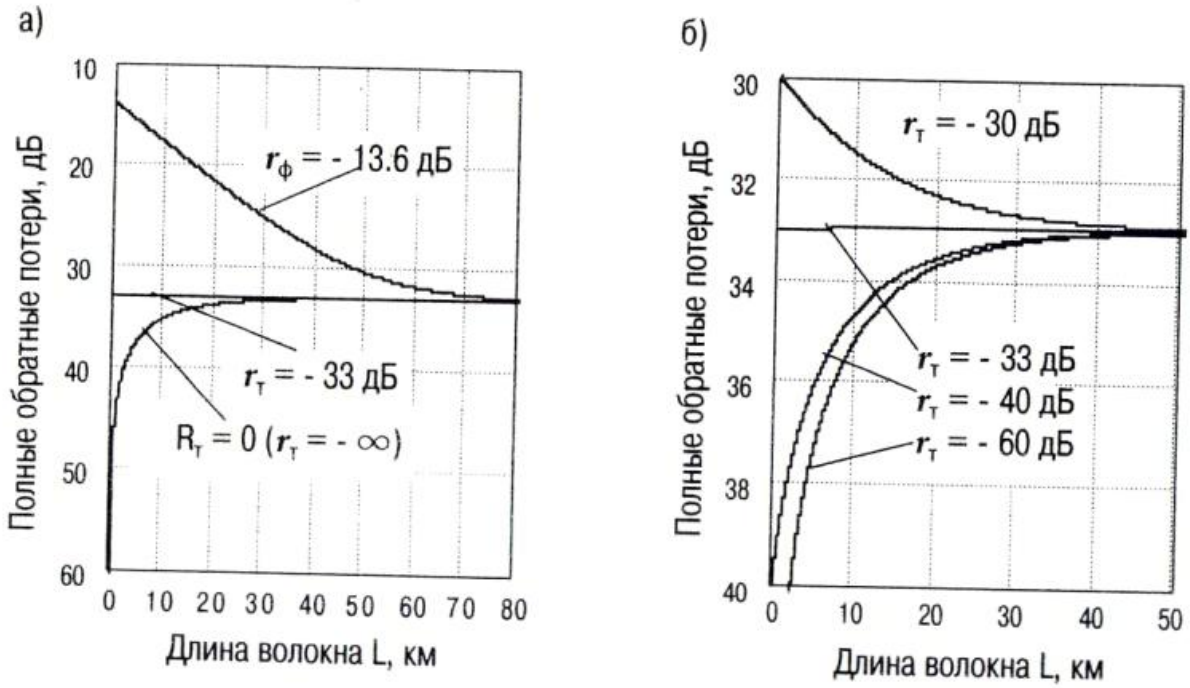


Рис. 3.38. Полные обратные потери в отрезке волокна длиной L с коэффициентом отражения от торца равном $\boldsymbol{r}_т$

Как видно из рис. 3.38 а, при $R_т = 0$ ($\boldsymbol{r}_т = -\infty$) обратные потери уменьшаются с увеличением длины волокна и стремятся к предельному значению 33 дБ. При $\boldsymbol{r}_т = -33$ дБ они не зависят от длины волокна и равны 33 дБ. При $\boldsymbol{r}_т = \boldsymbol{r}_ф = -13.6$ дБ (френелевское отражение) обратные потери увеличиваются с ростом длины волокна и также стремятся к 33 дБ. Вклад от френелевского отражения с дальнего конца волокна в обратные потери заметен почти до 70 км.

Зависимость ***ORL*** от длины волокна при малых значениях коэффициента отражения $\boldsymbol{r}_т$, характерных для РС разъемов (от –40 дБ до –60 дБ), изображена на рис. 3.38б. Видно, что при длине волокна более 20 км вклад в полные обратные потери от оптических РС разъемов уже мало заметен. Поэтому качество линии передачи принято характеризовать не только величиной ***ORL*** всего регенерационного участка линии, но и величиной ***ORL*** в строительных длинах оптического кабеля, так как при малых длинах вклад от оптических разъемов в ***ORL*** более заметен.

Требования к величине ***ORL*** для STM-16 (2.5 Гбит/с) относительно невысоки. Величина ***ORL*** для всего регенерационного участка линии должна быть больше 24 дБ, а для отдельных неоднородностей в линии больше 27 дБ. Например, для того, чтобы отрезок волокна удовлетворял этим требованиям достаточно, как видно из рис. 3.38, чтобы коэффициент отражения от торца волокна был меньше –33 дБ.

4

ИЗМЕРЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОН

В настоящее время установлено, что срок службы оптических кабелей определяется, в основном, величиной натяжения волокон. Дело в том, что под действием нагрузки кварцевые волокна постепенно снижают свою прочность из-за роста трещин на их поверхности. Это явление, называемое статической усталостью стекла, объясняется совместным действием напряжения и молекул веществ (в первую очередь воды), попадающих в трещину и активирующих разрыв химических связей в её вершине. Для оценки срока службы волокна обычно используют выражение:

$$t = t_{\text{o}} \left(\frac{\varepsilon_{\text{п}}}{\varepsilon} \right)^{n}, \qquad (4.1)$$

где $n \cong 20...22$ – параметр статической усталости волокна, $\varepsilon_{\text{п}}$ – относительное удлинение волокна при его перемотке под нагрузкой, ε – относительное удлинение волокна в процессе эксплуатации, t_{o} – параметр имеющий размерность времени.

Из (4.1) видно, что если в процессе эксплуатации волокно удлинится до величины $\varepsilon = \varepsilon_{\text{п}}$, то его срок службы будет равен t_{o}. Типичное значение этого параметра, для волокна длиной 100 км, составляет сотые доли секунд, что несравненно много меньше номинального срока службы волокна (25 лет). Ситуацию спасает очень большая величина показателя степени в выражении (4.1): $n = 20...22$. Так для того, чтобы достичь срока службы в 25 лет необходимо, чтобы относительное удлинение волокна в процессе эксплуатации было всего лишь в 3 - 4 раза меньше относительного удлинения волокна в процессе его перемотки.

Для оценки срока службы волокна, из-за его сильной степенной зависимости от величины удлинения волокна, по существу, необходимо знать только три параметра: ε, $\varepsilon_{\text{п}}$ и n. Значения относительного удлинения волокна при его перемотке под нагрузкой $\varepsilon_{\text{п}}$ и параметра статической усталости n обычно приводятся в спецификациях на волокно. Величину же относительного удлинения волокна ε необходимо каким-то образом контролировать в процессе его эксплуатации. В настоящее время величину натяжения волокон в уложенном в линию кабеле удается измерить только с помощью бриллюэновского рефлектометра (BOTDR – Brfflouin Optical Time Domain Reflectometer).

В этой главе мы обсудим факторы, влияющие на прочность и долговечность кварцевых волокон, и методы бриллюэновской рефлектометрии позволяющие находить распределение натяжения вдоль волокна.

Раздел I

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКОН

§ 1. Разрывная прочность

Результаты измерений прочности стандартных одномодовых волокон приведены на рис. 4.1. Длина образцов 0.5 м, количество образцов 20, скорость удлинения 20 мм/мин. При скорости 20 мм/мин образец волокна длиной 0.5 м удлинится на 7.5 % (37.5 мм) примерно за 2 мин. Волокно разрывается с очень узким разбросом значений при силе порядка 5.8 кгс или учитывая, что диаметр кварцевой оболочки волокна равен 125 мкм, при напряжении $\sigma_{\text{p}} \cong 4.8$ ГПа. Относительное удлинение волокна однозначно связано с величиной напряжения, так как кварцевое волокно подчиняется закону Гука ($\sigma = E \cdot \varepsilon$) в широком интервале напряжений вплоть до разрушения. Для кварцевого стекла модуль Юнга

E = 72 ГПа, соответственно, получаем, что напряжение $\sigma_р \cong 4.8$ ГПа приводит к удлинению 6.7 %.

Рис. 4.1. Зависимость вероятности разрушения стандартного одномодового волокна от величины приложенной нагрузки

Предельная разрывная прочность бездефектного кварцевого волокна определяется величиной напряжения, при котором происходит разрыв атомных связей в кварцевом стекле: $\sigma_т$ = 20 ГПа ($\varepsilon \sim 25\%$). Это примерно в 4 раза больше величины разрывной прочности для стандартных одномодовых волокон. Такое заметное снижение прочности реальных волокон объясняется тем, что на их поверхности имеются трещины, а материал, из которого изготовлены волокна (кварцевое стекло), является хрупким, не проявляющим пластичности телом. В хрупком материале воздействие растягивающей нагрузки приводит к возникновению локальных напряжений в вершине трещин, которые не могут релаксировать за счет пластической деформации. При этом локальные напряжения в вершине узкой трещины $\sigma_{лок}$ могут быть в десятки раз больше напряжения σ, с которым растягивается волокно (рис. 4.2).

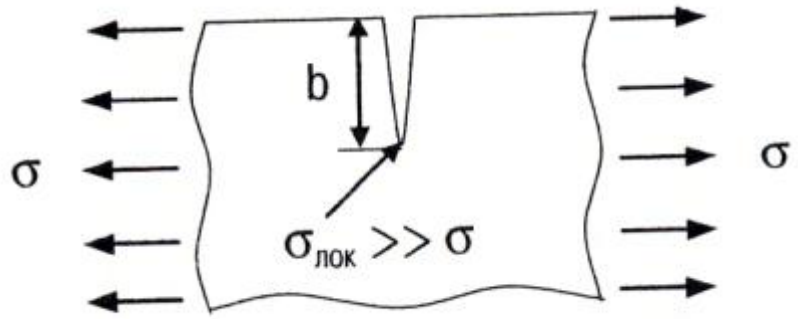


Рис. 4.2. Поперечное сечение трещины, находящейся под растягивающим напряжением

Например, для узкой эллиптической трещины ($\rho/b << 1$)

$$\sigma_{лок} = \frac{\sigma}{2} \cdot \sqrt{\frac{b}{\rho}}, \tag{4.2}$$

где b – длина большой полуоси эллипса, а ρ – радиус кривизны в вершине эллипса. Волокно разрушается, когда напряжение в вершине трещины $\sigma_{лок}$ достигнет критического значения $\sigma_т$. При этом величина напряжения, разрушающего волокно, будет меньше критического:

$$\sigma_р = 2\sqrt{\frac{\rho}{b}}\sigma_т = k\frac{1}{\sqrt{b}} \tag{4.3}$$

Для трещин глубиной 0.1…10 мкм величина k ~ 0.5…1 ГПа мкм$^{1/2}$. Формула (4.3) позволяет оценить разрывную прочность волокна при наличии одной трещины с известными размерами. Однако таких трещин в волокне бывает много, а их размеры изменяются случайным образом. Поэтому для описания прочности волокна используют статистический подход. При расчетах обычно используется интегральное распределение Вейбулла (рис. 4.3а)

$$F = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}\right)^m\right) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{\sigma_o}\right)^m\right) \qquad (4.4)$$

где σ_o и ε_o – наиболее вероятные значения напряжения и относительного удлинения волокна при его разрушении.

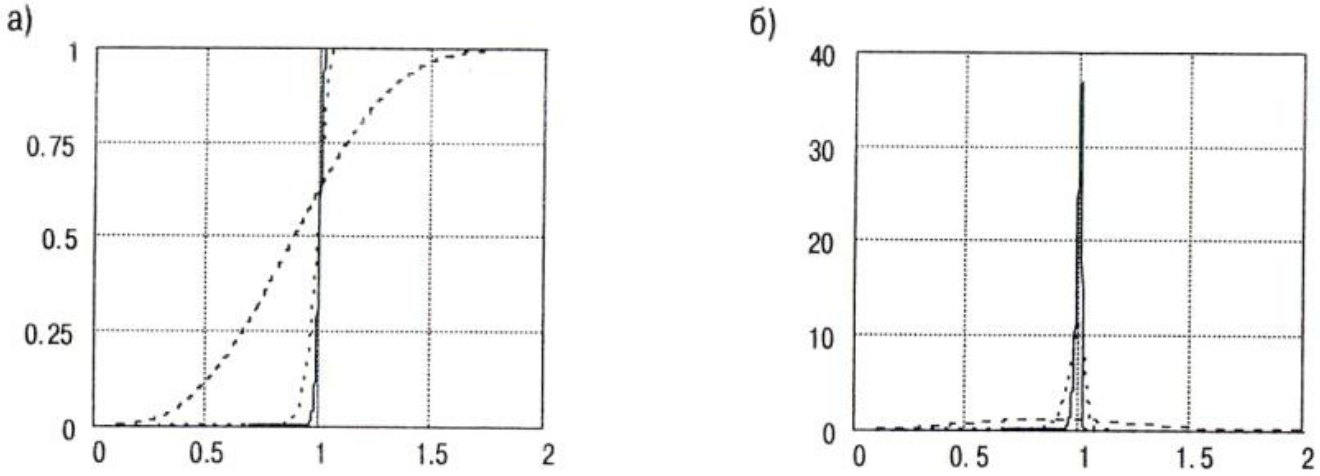


Рис. 4.3. Интегральное распределение Вейбулла (а) и распределение плотности вероятности (б), при m = 100, 30, 3 (сплошная линия, точки, пунктир)

Распределение Вейбулла удобно тем, что позволяет с помощью только одного параметра m характеризовать величину относительной флуктуации (σ или ε). Чем больше величина параметра m, тем меньше величина этой флуктуации (при m > 5 она порядка 1/m). Или иначе, чем больше величина параметра m, тем уже распределение плотности вероятности: $f\left(\frac{\sigma}{\sigma_o}\right) = \frac{dF}{d\frac{\sigma}{\sigma_o}} = m\left(\frac{\sigma}{\sigma_o}\right)^{m-1} \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{\sigma_o}\right)^m\right)$ (рис. 4.3б).

Величину параметр Вейбулла m можно оценить по экспериментальной зависимости вероятности разрушения волокна от величины натяжения волокна (рис. 4.4). Для большинства типов волокон параметр m составляет большую величину порядка 50...80, т.е. разрывная прочность имеет очень узкий разброс значений. Для более точного определения величины параметра m интегральную вероятность разрушения волокна обычно откладывают в координатах Вейбулла: по оси абсцисс разрывную прочность волокна в логарифмическом масштабе, а по оси ординат вероятность разрыва в масштабе $\ln\left(\ln\frac{1}{1-F}\right)$. В этих координатах наклон экспериментальной зависимости равен величине параметра m (рис. 4.4).

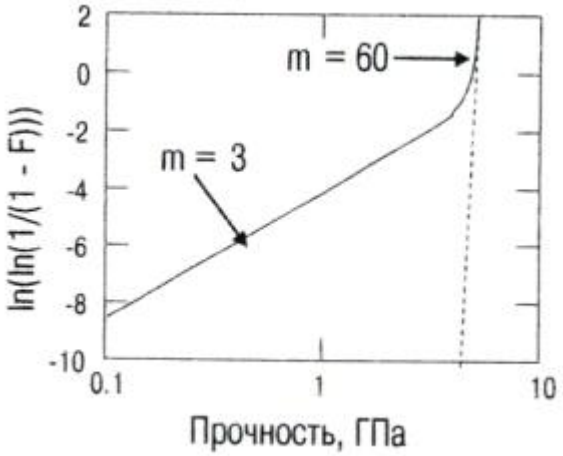


Рис. 4.4. Распределение прочности волокна в координатах ln(ln(1/(1 – F))) от ln σ

Как видно из рис. 4.4, экспериментальные результаты не ложатся на одну прямую. На графике наблюдается участок с очень большим наклоном (m ~ 50…80), соответствующий «бездефектным» образцам, а при достаточно большом количестве испытаний также и участок с малым наклоном (m ~ 1…5). Т.е. экспериментальные результаты во всем диапазоне натяжений волокон не описываются распределением Вейбулла с одним значением параметра m.

Чтобы понять, почему так происходит, оценим вероятность разрыва при m = 50, σ_o = 5 ГПа и σ = 1 ГПа. С помощью (4.4) находим $F = 1 - \exp\left(-\left(\frac{1}{5}\right)^{50}\right) \cong \left(\frac{1}{5}\right)^{50} \cong 2^{-50} \cdot 10^{-50}$. Т.е. по этой оценке волокно при натяжении 1 ГПа никогда не оборвется. При таком натяжении волокно обычно перематывается в процессе его изготовления. И как показывает опыт волокно все же обрывается, хотя и достаточно редко (один обрыв на несколько десятков километров).

Объясняется это тем, что в волокне присутствуют достаточно сильные, хотя и редкие технологические дефекты.

Таким образом, малый разброс разрывной прочности на коротких отрезках волокна не гарантирует отсутствие нескольких сильных дефектов на многокилометровых длинах волокон. Для их отбраковки осуществляется контрольная перемотка волокна под нагрузкой. При этом волокно сматывается с катушки с малым натяжением, проходит через специальное приспособление, где создается требуемая нагрузка, и после этого наматывается на другую катушку опять с малым натяжением (рис. 4.5).

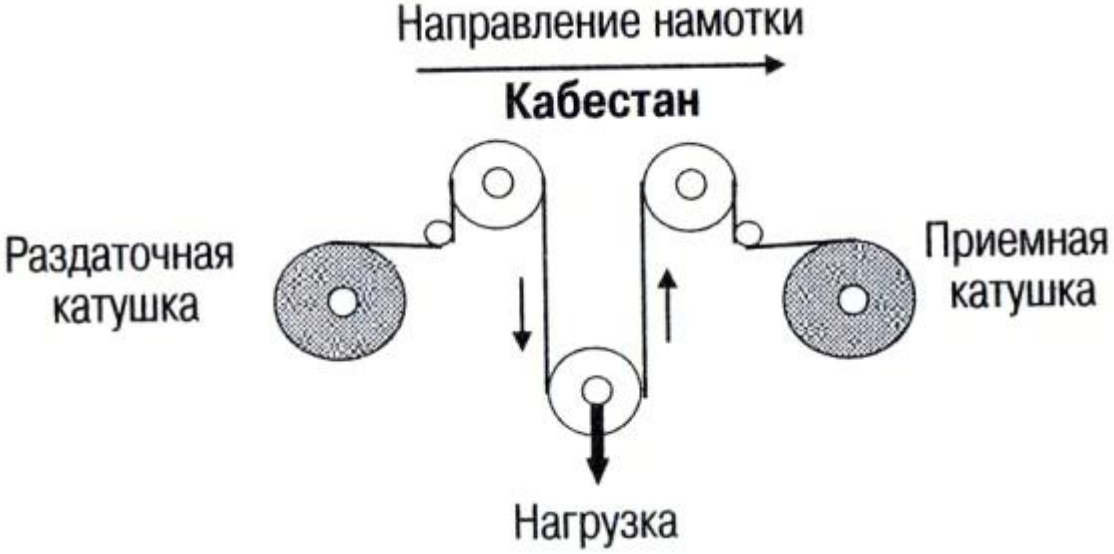


Рис. 4.5. Схема установки для контроля прочности (proof-test) волокна

Каждый участок волокна последовательно оказывается при напряжении 0.7-1.4 ГПа в течение 1 сек или менее, в зависимости от конструктивных особенностей установки. При этом разрушаются все трещины глубиной ~1 мкм, а один обрыв приходится на десятки километров перемотанных волокон. Таким образом, удается получать волокна длиной несколько десятков километров с прочностью порядка 1 ГПа, что вполне достаточно для их практического применения. При расчетах срока службы волокна необходимо использовать значение параметра m, полученное при напряжении, с которым перематывается волокно 0.7…1.4 ГПа. Для волокон компаний Fujikura и Sumitomo значение параметра m примерно равно трем.

§ 2. Статическая усталость

Получение длинных (~30 км) и прочных волокон ($\sigma_р \sim 1$ ГПа) – это только часть проблемы обеспечения надежности линии связи. Дело в том, что в присутствии влаги волокно разрушается, даже если приложенное к нему напряжение меньше $\sigma_р$. Это явление, называемое статической усталостью, ограничивает срок службы волокна. Оно представляет собой стимулированный напряжением процесс коррозии в вершине трещины. В этом процессе молекулы воды, попадающие в трещину из окружающей среды, активируют разрыв химических связей в вершине трещины, что приводит увеличению длины трещины под действием приложенного к волокну напряжения. По мере увеличения длины трещины растет концентрация напряжения в ее вершине $\sigma_{лок}$ и увеличивается скорость роста трещины, что приводит, в конечном итоге, к разрушению волокна, когда $\sigma_{лок}$ достигает критического значения $\sigma_т$ (рис. 4.6).

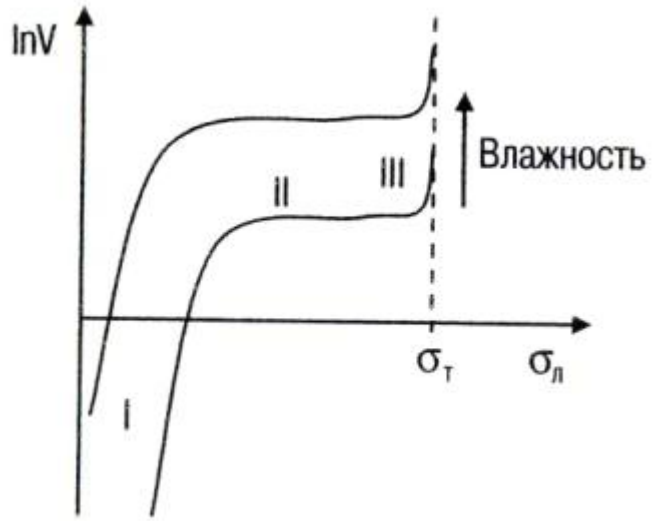


Рис. 4.6. Качественный вид зависимости скорости роста трещины от величины напряжения в ее вершине $\sigma_л$.

Кривая скорости роста трещины, имеет три характерных участка. На участке I (при малых напряжениях) скорость экспоненциально зависит от напряжения, как и должно быть, при активационном процессе с энергией активации зависящей от напряжения в вершине трещины. Одновременно существует и зависимость от содержания воды в окружающей среде. Таким образом, на участке I скорость роста трещины определяется совместным действием напряжения в вершине трещины и скоростью транспортировки молекул воды к вершине трещины. На участке II скорость роста трещин практически не зависит от напряжения в вершине трещины и определяется только скоростью транспортировки молекул воды к вершине трещины. При еще больших напряжениях (участок III) скорость снова экспоненциально растет с напряжением. На этом участке рост трещин обусловлен термофлуктуационным разрывом химических связей.

Практически важным для определения времени до разрушения волокна при его растяжении является первый участок. При расчетах скорость роста трещин на этом участке обычно представляют в виде степенной зависимости:

$$\frac{db}{dt} = A\sigma_{\text{лок}}^{n} = B\left(\sigma\sqrt{b}\right)^{n} \tag{4.5}$$

где учтено, что $\sigma_{\text{лок}}^{n} \sim \sigma\sqrt{b}$, σ – напряжение растяжения волокна, b – глубина трещины, A, B и n – коэффициенты, характеризующие скорость роста трещины и зависящие от технологии изготовления волокон и окружающей их среды.

Решение уравнения (4.5) имеет вид: $B\sigma^{n}t = \frac{2}{n-2}\left(b_{\text{o}}^{-\frac{n-2}{2}} - b^{-\frac{n-2}{2}}\right)$, где t – время до разрушения волокна при приложении к нему растягивающего напряжения σ, b_o и b – глубина трещины в начальный момент времени и в момент времени t. При $b_o << b$ можно исключить неизвестную константу B, образовав отношение:

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^{n} \tag{4.6}$$

где t_1 и t_2 – время до разрушения волокна при приложении к нему растягивающих напряжений σ_1 и σ_2. Выражение (4.6) показывает, как изменится время до разрушения у двух образцов волокон с одинаковой исходной прочностью, находящихся в одинаковой среде, если к ним приложить две разные нагрузки σ_1 и σ_2. Величина показателя степени n (его называют параметром статической усталости) для специфицированных волокон порядка 20...22. Большая величина n означает, что даже небольшое снижение нагрузки сильно увеличивает срок службы волокна. Например, при n = 22 снижение нагрузки на 10 % увеличивает срок службы волокна примерно в 8 раз.

Выражение (4.6) может быть использовано для нахождения величины параметра n статическим методом путем подвешивания к волокну груза или намотке волокна на оправку. Логарифмируя (4.6), получаем выражение: $\ln(t) = -n\ln(\sigma) + \text{const}$. Следовательно, на графике ln(t) от ln(σ) результаты статических испытаний должны лежать на прямой линии с наклоном – n. Однако, наиболее распространен динамический метод нахождения параметра n. Этот метод можно применять на промышленных установках, для измерения прочности материалов на разрыв (рис. 4.7).

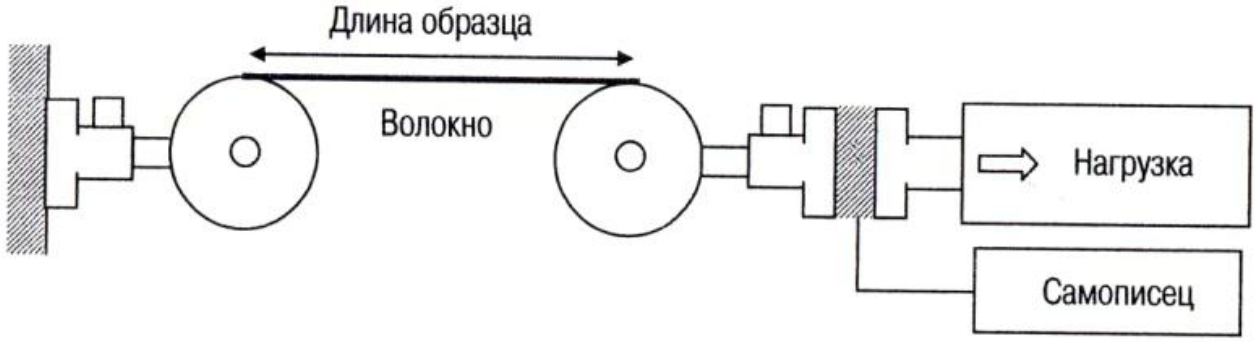


Рис. 4.7. Схема установки для измерения разрывной прочности волокна

На этих установках нагрузка обычно растет линейно со временем $\sigma = \sigma' t$ (σ' – скорость нагружения). Рассуждая аналогично, как и при выводе выражения (4.6) получим соотношение:

$$\frac{\sigma_1'}{\sigma_2'} = \left(\frac{\sigma_{\text{p1}}}{\sigma_{\text{p2}}}\right)^{n+1} \tag{4.7}$$

Выражение (4.7) показывает, что если два образца волокна с одинаковой исходной прочностью испытывать с разными скоростями нагружения σ_1' и σ_2' в одинаковых

условиях, то величина разрывной прочности σ_p получится разной. Это явление, называемое динамической усталостью (по аналогии со статической усталостью), имеет простое объяснение. При постепенном увеличении нагрузки начинается рост исходных дефектов в образце, активированный молекулами воды. Причем, чем медленнее скорость нагружения, тем до большей величины вырастут дефекты, и тем меньше будет величина разрывной прочности.

Прологарифмировав (4.7), получаем: $\ln(\sigma) = \frac{1}{n+1}\ln(\sigma') + \text{const}$. Следовательно, на графике ln(σ)от ln(σ') (или ln(P) от ln(σ'), где P – усилие на разрыв) результаты статических испытаний должны лежать на прямой линии с наклоном 1/(n + 1). Экспериментальная зависимость напряжения разрыва стандартного одномодового волокна от скорости вытяжки приведена на рис. 4.8. Длина образцов 0.5 м, количество образцов 20, измеренное значение параметра n = 20.3.

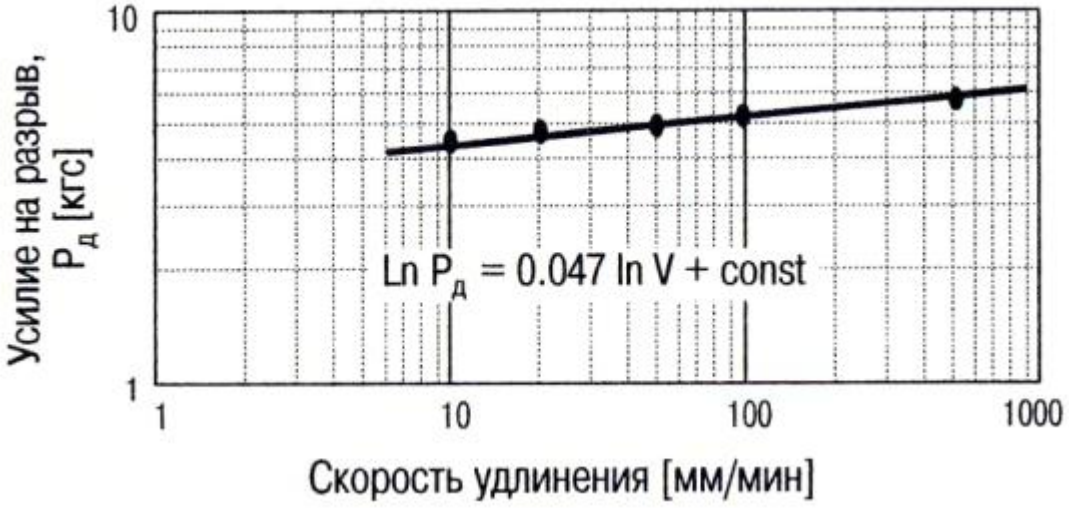


Рис. 4.8. Результаты динамических испытаний прочности стандартных одномодовых волокон

Из рис. 4.8 видно, что об определенном значении прочности волокна можно говорить только при наличии данных о скорости его растяжения в разрывной машине. Более определенным является понятие инертной прочности волокна, т.е. такой прочности которой обладало бы волокно при условии отсутствия в нем роста трещин. Инертная прочность волокна примерно в 2 раза выше прочности, измеряемой обычно с помощью разрывной машины. На этот уровень асимптотически выходит кривая зависимости прочности волокна от скорости его нагружения на разрывной машине.

Достичь уровня инертной прочности удается только при очень быстром растяжении волокон (что нельзя сделать на обычной разрывной машине) или при испытании волокон в условиях исключающих воздействие паров воды. Например, в высоком вакууме (после удаления абсорбированной на поверхности стекла влаги) или при низких температурах (в жидком азоте). Поэтому это понятие представляет чисто теоретический интерес.

Статическая усталость волокна может проявляться как небольшой искажающий фактор, который надо учитывать при обработке результатов измерений на разрывной машине или использовать для определения величины параметра n. В то же время в линии передачи, где волокна могут быть подвергнуты натяжению в течение нескольких десятков лет, статическая усталость волокна является фундаментальной причиной, ограничивающей ее долговечность.

§ 3. Долговечность волокон

Полиакрилатное покрытие защищает кварцевую оболочку волокна от соприкосновения с твердыми телами, но не защищает ее от воздействия воды. Любые известные полимерные покрытия волокна только задерживает на некоторое время

проникновение влаги к поверхности кварцевой оболочки. Например, при изменении влажности прочность волокна в полиакрилатном покрытии выходит на новый уровень через десятки минут. Вода практически всегда присутствует в линии передачи, поэтому для деградации такой линии достаточно только натяжения волокна. От величины натяжения зависит разрушиться волокно почти мгновенно или через многие десятки лет. Качественный характер изменения прочности волокна в процессе перемотки и эксплуатации изображен на рис. 4.9.

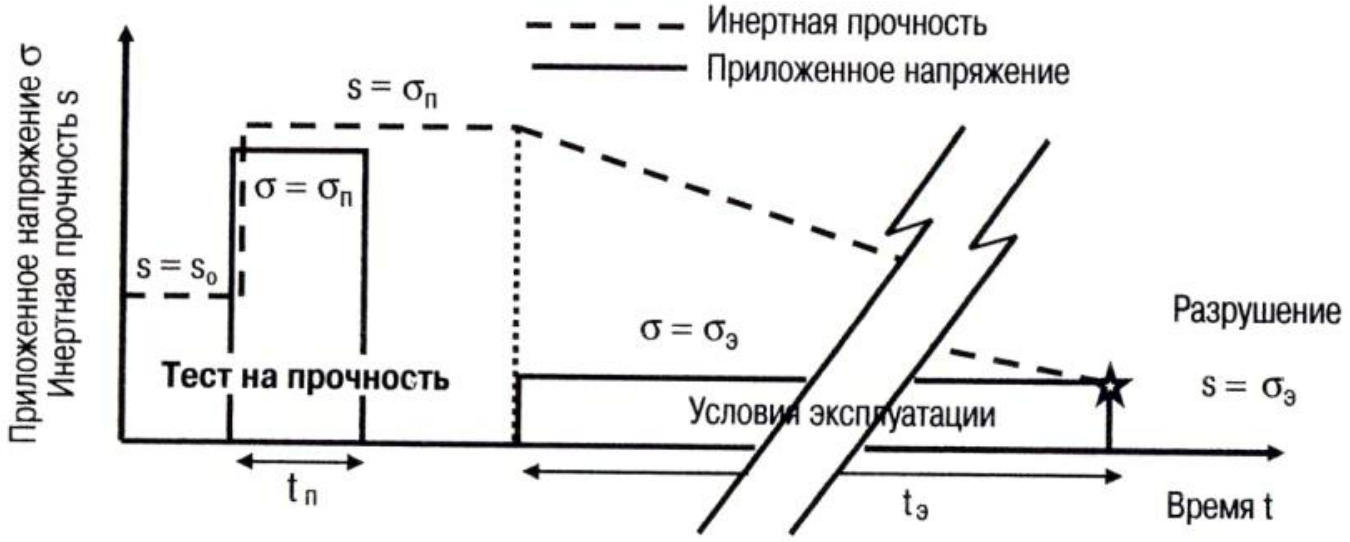


Рис. 4.9. Схема изменения прочности волокна в процессе перемотки и эксплуатации

Как видно из рис. 4.9, до перемотки инертная прочность s_o на некоторых участках волокна была меньше напряжения, создаваемого при перемотке волокна $\sigma_п$. При перемотке слабые участки волокна (где $s_o < \sigma_п$) разрушились, и остались целыми только те участки волокон, инертная прочность которых больше $\sigma_п$. В процессе эксплуатации при напряжении $\sigma_э < \sigma_п$ инертная прочность волокна s постепенно уменьшается. Когда она сравнивается с $\sigma_э$, волокно разрушается. Таким образом, срок службы волокна $t_э$ зависит не только от напряжения, создаваемого в процессе эксплуатации волокна, но и от напряжения, с которым оно перематывается.

Муцинаге и др. (Electron Lett., 1981) удалось учесть изменение прочности волокна в обоих этих процессах и получить выражение для долговечности волокна. В настоящее время оно широко используется при оценке долговечности линий передачи и датчиков физических величин. Подробный анализ этой проблемы можно найти в более поздней работе Komachiya M., et all, Appl. Optic. 1999). Мы приведем его без вывода:

$$t_э = t_o\left(\frac{\varepsilon_п}{\varepsilon}\right)^n = t_o\left(\frac{\sigma_п}{\sigma}\right)^n \tag{4.8}$$

$$t_o = \left(\left(1-\frac{1}{LN_П}\cdot\ln(1-F)\right)^{\frac{n-2}{m}} - 1\right)\cdot t_П, \tag{4.9}$$

где F – вероятность разрушения волокна в процессе эксплуатации, L – длина волокна, $N_П$ – среднее число обрывов волокна на единицу длины при его перемотке, $\varepsilon_П$ – относительное удлинение волокна в процессе перемотки, ε – относительное удлинение волокна в процессе эксплуатации, m – параметр Вейбулла, n – параметр статической усталости, $t_П$ – время действия нагрузки при перемотке.

При $\sigma = \sigma_п$, как видно из (4.8), срок службы волокна равен t_o. Выражение для t_o можно упростить, так как для практически интересных случаев выполняются условия: $F << 1$ и $F/L\ N_П << 1$. В этих приближениях выражение (4.9) приводится к виду:

$$t_o = \frac{F(n-2)t_п}{mLN_п}. \qquad (4.10)$$

Для оценки величины t_o положим F = 0.001, что соответствует, принятому для военной аппаратуры критерию надежности: 0.999. Для стандартных одномодовых волокон: $N_П$ = 0.01 км$^{-1}$, n = 22, m = 3. Для типичной длины регенерационного участка линии L = 100 км и $t_п$ = 1 с находим: $t_o \approx 0.01$ сек, что несравнимо меньше требуемой величины срока службы ~ 25 лет (1 год ≈ 3×10^7 сек).

Срок службы волокна увеличивается при уменьшении ε и стремится к бесконечности при $\varepsilon \to 0$. Поэтому вопрос заключается только в том, не будет ли значение ε, необходимое для достижения срока службы в 25 лет, нереально малым. Это зависит, в основном, от значений двух величин: $\varepsilon_п$ и n. При этом существенно, что параметр динамической прочности n входит в выражение (4.8) как показатель степени в отношении $\varepsilon_п/\varepsilon$, поэтому значение n = 22, по существу, является очень большой величиной.

Так, например, при $\varepsilon/\varepsilon_п = 0.1$ значение $(\varepsilon_п/\varepsilon)^n$ достигает астрономически большой величины $\sim10^{22}$ и срок службы волокна, несмотря на малую величину коэффициента t_o формально будет равен огромной величине $\sim10^{20}$ сек, т.е. почти 10^{13} лет. А для того, чтобы достичь срока службы равного 25 годам, необходимо, чтобы отношение $\varepsilon/\varepsilon_п$ было меньше 0.3 (рис. 4.10). Т.е. достаточно того, чтобы относительное удлинение волокна в процессе эксплуатации было примерно 3 раза меньше относительного удлинения волокна в процессе его перемотки.

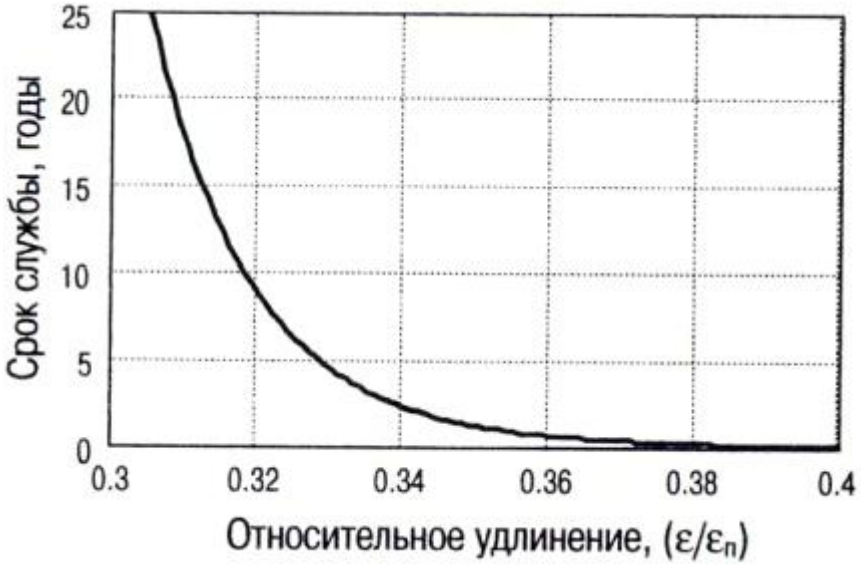


Рис. 4.10. Зависимость срока службы волокна от величины его относительного удлинения

Из рис. 4.10 видно, что при достижении критического отношения $\varepsilon/\varepsilon_п$ кривая идет вниз очень круто. Поэтому нет смысла говорить о конкретной величине срока службы волокна, а можно лишь определить величину удлинения волокна, при котором (в рамках рассматриваемой модели) волокно ещё не разрушается. Из-за большой величины параметра n значения параметров, входящих в выражение для t_o, слабо влияют на требуемое значение отношения $(\varepsilon/\varepsilon_п)$. Поэтому механическую прочность волокон можно характеризовать только двумя параметрами (n и $\varepsilon_п$). В стандарте G 652. рекомендуется значение параметра динамической прочности n ≈ 20 и $\varepsilon_п$ = 1% ($\sigma_п$ = 0.7 ГПа). Этим требованиям удовлетворяют практически все типы волокон.

Если в линиях передачи натяжение в волокне возникает при действии внешних факторов, которые не всегда можно учесть, то в датчиках физических величин, например, в волоконных гироскопах натяжение волокна создается уже в процессе изготовления датчиков. В них напряжение возникает из-за того, что при намотке на катушку волокно изгибается так, что внешний край оказывается длиннее оси волокна на $\pi\times d_{кв}$, где $d_{кв}$ – диаметр кварцевой оболочки волокна. Учитывая, что длина одного витка волокна (с

диаметром покрытия $d_{кв}$) намотанного на катушку диаметром D равна $\pi\times(D + d_{кв})$ находим величину относительного удлинения внешнего края волокна:

$$\varepsilon_{д} = \frac{d_{кв}}{(D + d_{ак})} \approx \frac{d_{кв}}{D}. \quad (4.11)$$

Для волокна перемотанного с $\varepsilon_{п} = 1\%$ допустимая величина $\varepsilon_{д} = 0.3\%$. Отсюда получаем, что минимальный диаметр катушки на котором срок службы волокна будет порядка 25 лет равен $D_{min} = 3\times10^{2}\times d_{кв}$. Для $d_{кв} = 125$ мкм получаем, что $D_{min} = 4$ см.

Следует отметить, что оценка долговечности волокна с помощью выражений (4.8) и (4.9) является приближенной. Во-первых, сама модель является приближенной и, во-вторых, не все предположения сделанные при выводе этих выражений выполняются на практике. Например, предполагается, что параметры, характеризующие скорость роста трещин одинаковы при переметке волокон и при их эксплуатации. Однако эксплуатация волокон происходит обычно в значительно менее благоприятных условиях (например, при повышенной влажности), чем перемотка. На величину параметра статической усталости n может повлиять температура и некоторые химические вещества в полимерном покрытии волокна (например, аммиак), которые, как и вода, увеличивают скорость роста трещин. Кроме того, любые методы ускоренного старения не могут с достаточно полной достоверностью воспроизвести условия долговременной эксплуатации волокон.

Чтобы получить более достоверную информацию о прочности оптических волокон, подвергшихся старению при их долговременной эксплуатации, сотрудники компании Corning провели исследование волокон, извлеченных из оптического кабеля. Кабель был изготовлен за девять лет до этих испытаний и находился в эксплуатации на протяжении 5 лет. Подвергнутый испытаниям отрезок кабеля представлял собой излишек, образовавшийся вследствие реконфигурации сети. Подземный кабельный канал находился в 150 м от реки и кабель нередко затапливался водой.

Параллельно с волокнами, подвергшимися старению внутри кабеля («волокна из кабеля»), исследовались и образцы других волокон. Три образца волокна, были изготовлены примерно тогда же, когда волокна в исследуемом кабеле («волокна из архива»). Эти волокна были намотаны на транспортировочные катушки и хранились на складе где температура и влажность не регулировались. Результаты испытаний обоих типов волокон сравнивались с результатами испытаний вновь изготовленного волокна с таким же типом покрытия («новые волокна»).

Исследования старения волокон можно разделить на два типа: измерение прочности, собственно, стекловолокна и проверка наличия изменений в его покрытии. Первый тип измерений позволяет не только получить результаты прямых измерений прочности волокон, подвергшихся старению в реальных условиях, но проверить также положение о том, что в отсутствие натяжений прочность волокна не уменьшается. Второй тип измерений важен потому, что деградация покрытия может привести к тому, что оно будет отслаиваться от оболочки волокна.

Основные результаты:

• Средняя шероховатость поверхности кварцевой оболочки волокон (измерения с помощью атомного силового микроскопа): у «волокон из кабеля» – 0.26 нм, у «волокон из архива» – 0.29 нм, у «новых волокон» – 0.1…0.2 нм.

• Прочность на разрыв у всех типов волокон около 5.5 кгс

• Среднее значение силы снятия покрытия у всех типов волокон удовлетворяет требованиям Bellcore (0.5…3 кгс/м)

• Температура стеклования покрытия (~ 5° С) после старения не изменилась.

Основные выводы:

• Долговременная эксплуатация волокон в реальных условиях не привела к ухудшению их прочностных характеристик

• Старение волокон при отсутствии натяжения не уменьшает их прочности.

ИЗМЕРЕНИЕ НАТЯЖЕНИЯ ВОЛОКОН

§ 4. Метод бриллюэновской рефлектометрии

В спектре обратной волны в волокне кроме несмещенной по частоте компоненты, обусловленной релеевским рассеянием света, присутствуют также спектральные компоненты, вызванные бриллюэновским и рамановским рассеянием света (рис. 4.11). Появление этих компонент можно пояснить следующим образом. При релеевском рассеянии свет рассеивается на замороженных в волокне флуктуациях показателя преломления, и поэтому частота рассеянного света не меняется. При бриллюэновском и рамановском рассеянии частота рассеянного света меняется, так как рассеяние происходит на переменных во времени флуктуациях показателя преломления (вызванных, соответственно, тепловыми колебаниями плотности среды и внутримолекулярными колебаниями).

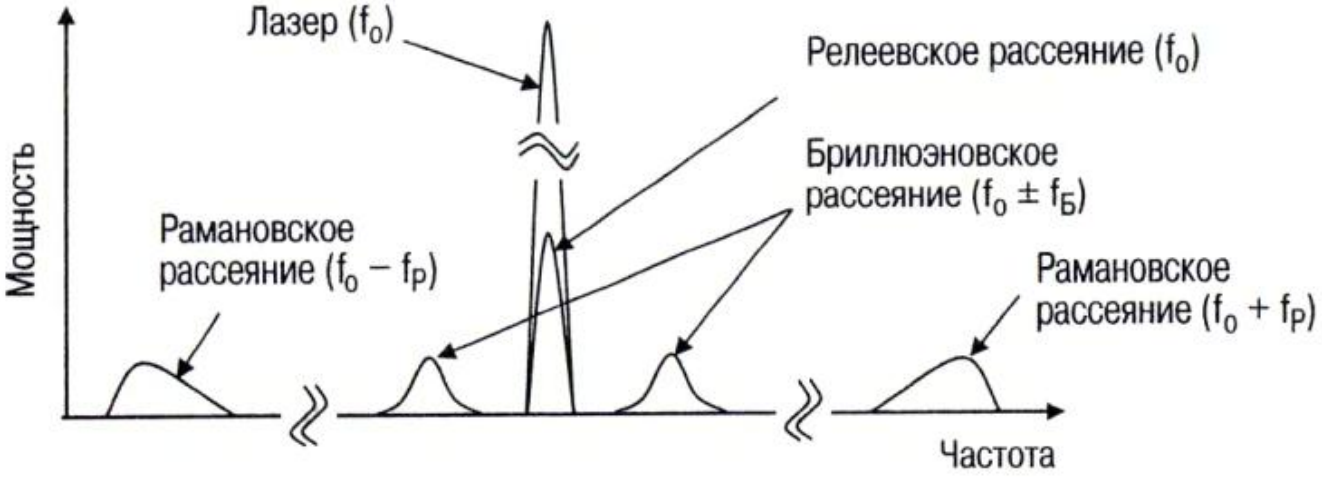


Рис. 4.11. Спектр рассеянного в волокне света ($f_Б$ ~ 10...11 ГГц, f_P ~ 13 ТГц)

До сих пор мы учитывали только релеевское рассеяние света, так как при мощности импульсов света менее 25…30 дБм именно оно дает основной вклад в мощность обратной волны. Для сравнения, коэффициент спонтанного бриллюэновского рассеяния $\alpha_Б \cong 0.03/\lambda^4$ примерно на 14 дБ меньше коэффициента релеевского рассеяния $\alpha_P \cong 0.75/\lambda^4$, где λ – длина волны излучения в [мкм].

Однако более слабые спектральные компоненты, обусловленные спонтанным бриллюэновским рассеянием света (SPBS – Spontaneous Brillouin Scattering), могут быть выделены с помощью оптического фильтра, так как они достаточно далеко разнесены по частоте. Эти компоненты интересны тем, что могут быть использованы для построения.

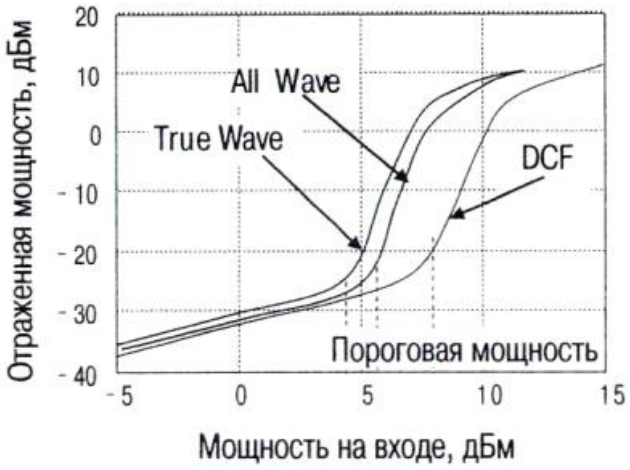


Рис. 4.12. Зависимость отраженной мощности от мощности на входе в волокно

Из рис.4.12 видно, что при достижении порогового значения (~5 дБм при непрерывной накачке) зависимость отраженной мощности от мощности накачки становится нелинейной. При пороговой мощности накачки вклад от SBS рассеяния становится сравнимым с релеевским рассеянием. Видно также, что при увеличении мощности накачки в несколько раз почти вся мощность отражается от волокна.

Пороговую величину мощности можно увеличить, уменьшая эффективную длину взаимодействия световой волны с акустической волной. Для одиночного импульса, как нетрудно видеть, эта эффективная длина равна половине длины импульса:

$$L_э = L_и = \frac{c\tau}{2n}, \tag{4.12}$$

где τ – длительность импульса, n = 1.5 – групповой показатель преломления волокна. Для типичного значения τ = 1 мкс получаем $L_э = L_и$ = 0.1 км, что примерно на два порядка меньше значения эффективной длины взаимодействия ($L_э$ = 20 км) для узкополосного источника излучения. Т.е. в оптическом импульсном рефлектометре величина пороговой мощности увеличивается примерно до 300 мВт (23 дБм).

Спектральные компоненты, обусловленные бриллюэновским рассеяния света, обладают тем важным для практических применений свойством, что их частота смещена на величину пропорциональную натяжению (относительному удлинению ε) волокна:

$$f_Б = f_{Б0} + K\varepsilon, \tag{4.13}$$

где $f_{Б0}$ – смещение частоты в отсутствие натяжения волокна. Оценим величину смещения частоты рассеянного света. Тепловые колебания плотности среды можно рассматривать как совокупность упругих волн, распространяющихся в среде по всевозможным направлениям и обладающих всевозможными частотами. Каждая плоская звуковая волна подобна дифракционной решетке, т.к. в местах повышенной плотности показатель преломления среды больше, чем в местах разряжения (рис. 4.13).

Рис 4.13. Схема рассеяния света на звуковой волне в волокне

Для световой волны длиной λ всегда найдется решетка с подходящим периодом, обеспечивающим максимальное отражение света в обратном направлении. Длина соответствующей звуковой волны определяется условием Брэгга-Вульфа: Λ = λ/2. В волокне бриллюэновское рассеяние наблюдается только назад (частотный сдвиг между накачкой и волной рассеянной в прямом направлении равен нулю). Волна, отраженная от такой движущейся дифракционной решетки, в силу эффекта Доплера будет смещена по частоте на величину:

$$f_Б = \left(\frac{2V_a n}{c}\right) f_o = \frac{2V_a n}{\lambda}, \tag{4.14}$$

где $V_a \cong 5.7$ км/с – скорость звука в волокне, n ≅ 1.46 – показатель преломления волокна, $c \cong 3\times10^5$ км/с – скорость света в вакууме. На длине волны λ = 1550 нм смещение частоты $f_Б$ = 10.7 ГГц.

Рассмотрим теперь зависимость частоты рассеянного света от натяжения (удлинения ε) волокна. От натяжения волокна зависит величина скорости звука V_a и показатель преломления n. В свою очередь, скорость звука $V_a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ зависит от модуля Юнга (E = 70 ГПа

= 7×10^{10} н/м^2) и плотности кварцевого стекла (ρ = 2.2 кг/м^3). Основной вклад в изменение частоты рассеянного света дает изменение модуля Юнга. Для стандартного одномодового волокна (SMF) измеренное значение коэффициента К = ($f_Б$ – $f_{Б0}$)/ε равно: 490 МГц/% (на λ = 1550 нм) и 580 МГц/% на(λ = 1310 нм) (рис. 4.14).

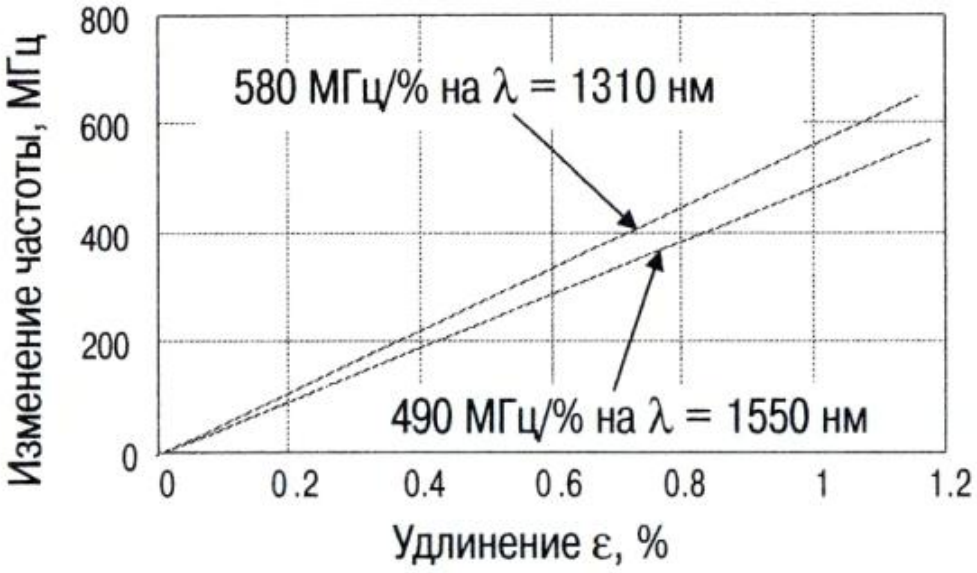


Рис. 4.14. Зависимость частоты рассеянного света от удлинения волокна

Метод бриллюэновской рефлектометрии обладает двумя основными преимуществами. Во-первых, это практически единственный оптический метод, позволяющий измерить величину абсолютного натяжения волокна. Для этого достаточно измерить частоту максимального сигнала в спектре бриллюэновского рассеяния и при этом нет необходимости подвергать волокно дополнительному растяжению. В других же известных оптических методах измеряется величина удлинения волокна, возникающего при создании в волокне дополнительного натяжения, что делает эти методы непригодными для определения натяжения волокна, уложенного в линию передачи.

Во-вторых, бриллюэновское рассеяние приводит к образованию обратной волны в волокне. Поэтому, зондируя волокно короткими импульсами и сканируя несущую частоту этих импульсов, можно найти распределение вдоль волокна спектра бриллюэновского рассеяния и, соответственно, частоты максимального сигнала в этом спектре. А, так как эта частота пропорциональна величине натяжения в волокне, то таким образом находится распределение этого натяжения вдоль волокна (рис. 4.15).

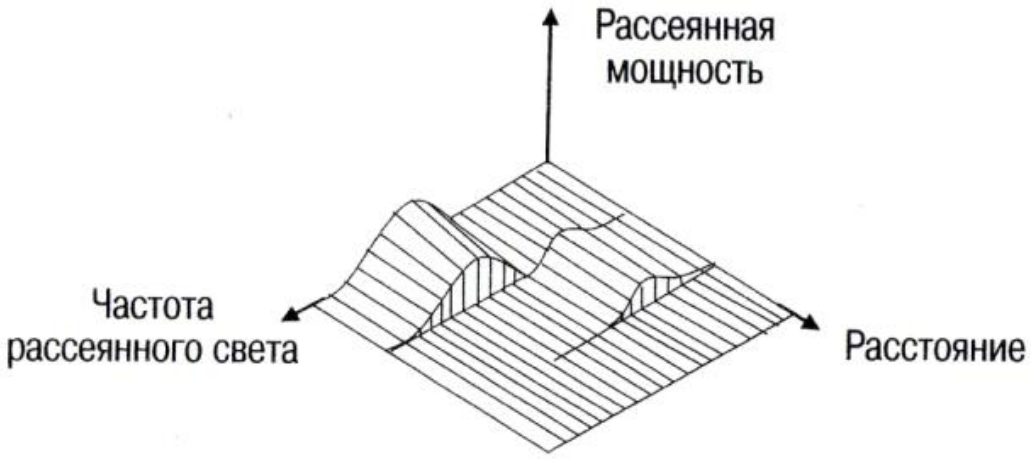


Рис 4.15. Распределение спектра бриплюэновского рассеяния света в волокне

Как видно из рис. 4.15, рефлектограмма, измеренная только на одной несущей частоте, не позволяет найти распределение вдоль волокна частоты максимального сигнала

в спектре бриллюэновского рассеяния. Поэтому для измерения распределения натяжения вдоль волокна необходимы приборы, выполняющие одновременно функции оптического импульсного рефлектометра и оптического анализатора спектра. Схемы построения таких приборов рассмотрены в следующих параграфах.

§ 5. Бриллюэновский анализатор (BOTDA)

В настоящее время метод бриллюэновской рефлектометрии применяется в бриллюэновском оптическом импульсном анализаторе (BOTDA – Brillouin Optical Time Domain Analyizer) и в бриллюэновском оптическом импульсном рефлектометре (BOTDR – Brillouin Optical Time Domain Reflectometer). В BOTDA используется явление вынужденного бриллюэновского рассеяния (SBS – Stimulated Brillouin Scattering), а в BOTDR – явление спонтанного бриллюэновского рассеяния (SPBS – Spontaneous Brillouin Scattering).

Как известно, явление SBS может быть использовано для создания волоконно-оптических усилителей с большим коэффициентом усиления и малой мощностью накачки. Для этого необходимо, чтобы оптический сигнал распространялся в волокне навстречу накачке, а ширина линии источника сигнала и источника накачки была меньше ширины линии бриллюэновского усиления (~30...50 МГц). Максимальное усиление достигается, когда частота зондирующего оптического сигнала f_c совпадает с частотой стоксовой компоненты ($f_o - f_Б$) в спектре бриллюэновского рассеяния.

Таким образом, можно найти величину смещения частоты при бриллюэновском рассеянии $f_Б$ и рассчитать величину абсолютного натяжения волокна. Распределение натяжения вдоль волокна можно найти, если использовать импульсную накачку. При импульсной накачке усиление сигнала будет происходить только в той области волокна, где в это время находится импульс. Поэтому по зависимости продетектированного сигнала от времени можно найти распределение натяжения вдоль волокна. Оптическая схема BOTDA изображена на рис. 4.16.

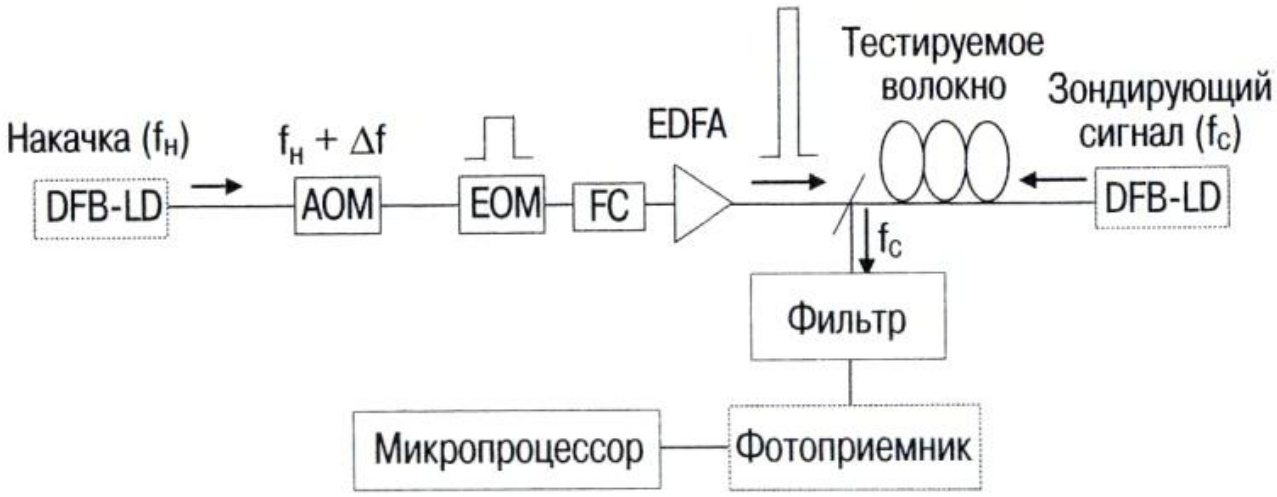


Рис. 4.16. Оптическая схема бриллюэновского анализатора (BOTDA)

Как показано на рис. 4.16, с одной стороны в волокно вводится излучение лазера накачки с частотой $f_Н$, а с другой стороны излучение зондирующего лазера с частотой f_c. После прохождения через акустооптический модулятор (AOM) частота излучения накачки становится равной $f_н + \Delta f$, где Δf – смещение частоты, создаваемое акустооптическим модулятором. Далее излучение накачки модулируется по амплитуде с помощью электроабсорбционного модулятора (EOM), усиливается с помощью оптического усилителя мощности (EDFA) и вводится в тестируемое волокно.

Коэффициент бриллюэновского усиления зависит от состояния поляризации излучения накачки и сигнала. Максимальное усиление достигается, когда эти состояния одинаковы в месте взаимодействия этих волн (на ширине импульса накачки). Из-за двулучепреломления волокна эти состояния поляризации изменяются вдоль волокна,

вообще говоря, случайным образом и их вариации приводят к замираниям отклика фотоприемника. Для того, чтобы устранить эти замирания перед оптическим усилителем устанавливается фарадевский вращатель (FC), периодически изменяющий состояние поляризации проходящего через него излучения.

Как уже говорилось, во встречном направлении в волокно вводится излучение от зондирующего лазера с частотой f_c. Это излучение усиливается при взаимодействии с импульсной накачкой за счет эффекта SBS, проходит через волокно и направляется с помощью оптического ответвителя на вход фотоприемника. Узкополосный оптический фильтр, установленный перед фотоприемником, не пропускает на фотоприемник сигнал релеевского рассеяния (на частоте $f_H + \Delta f$).

Смещение частоты, создаваемое акустооптическим модулятором Δf, изменяется дискретным образом с шагом примерно на порядок меньше, чем ширина линии бриллюэновского усиления (~30...50 МГц). Для каждой частоты накачки $f_H + \Delta f$ снимается рефлектограмма, что позволяет в конечном итоге получить трехмерное распределение спектра бриллюэновского усиления вдоль волокна, подобное тому, что изображено на рис. 4.15. Далее по распределению вдоль волокна частоты, соответствующей максимуму бриллюэновского усиления, рассчитывается распределение натяжения вдоль волокна.

Бриллюэновский анализатор (BOTDA) широко используется за рубежом при контроле натяжения волокон в заводских условиях. Однако BOTDA малопригоден для тестирования линий передачи, так как его необходимо подключать к обоим концам волокна. Поэтому компанией Ando (Япония) был разработан другой тип измерителя абсолютного натяжения волокна – бриллюэновский рефлектометр (BOTDR), который подключается только к одному концу волокна (рис. 4.17). По своему принципу действия он во многом схож с BOTDA и отличается в основном тем, что натяжение волокна находится не с помощью эффекта вынужденного бриллюэновского рассеяния (SBS), а по спектру спонтанного бриллюэновского рассеяния (SPBS).

§ 6. Бриллюэновский рефлектометр (BOTDR)

В BOTDR наблюдается SPBS эффект (а не SBS эффект) потому, что мощность импульсов, вводимая в волокно, не превышает (при длительности импульса $\tau < 100$ нс) порогового значения мощности для SBS эффекта (~23 дБм). Как известно, SBS эффект является самым низкопороговым нелинейным оптическим эффектом в волокне. Пороговое значение мощности при непрерывном излучении составляет для него всего лишь несколько дБм. Для импульсного излучения этот порог увеличивается примерно до 23 дБм за счет малой длины взаимодействия, равной половине ширины импульса (5 м при $\tau \sim 100$ нс). Пороговое значение мощности для вынужденного рамановского рассеяния больше 23 дБм и не зависит от длительности импульса.

Излучение накачки в BOTDR формируется также как и в BOTDA. Источником излучения служит DFB лазер, частотная модуляция излучения осуществляется акустооптической ячейкой (AOM), импульсная модуляция – электроабсорбционным модулятором (EOM), а поляризационная модуляция – фарадевским вращателем (FC). Излучение накачки вводится в волокно, а рассеянная назад мощность передается с помощью волоконного ответвителя на вход фотоприемника (рис. 4.17).

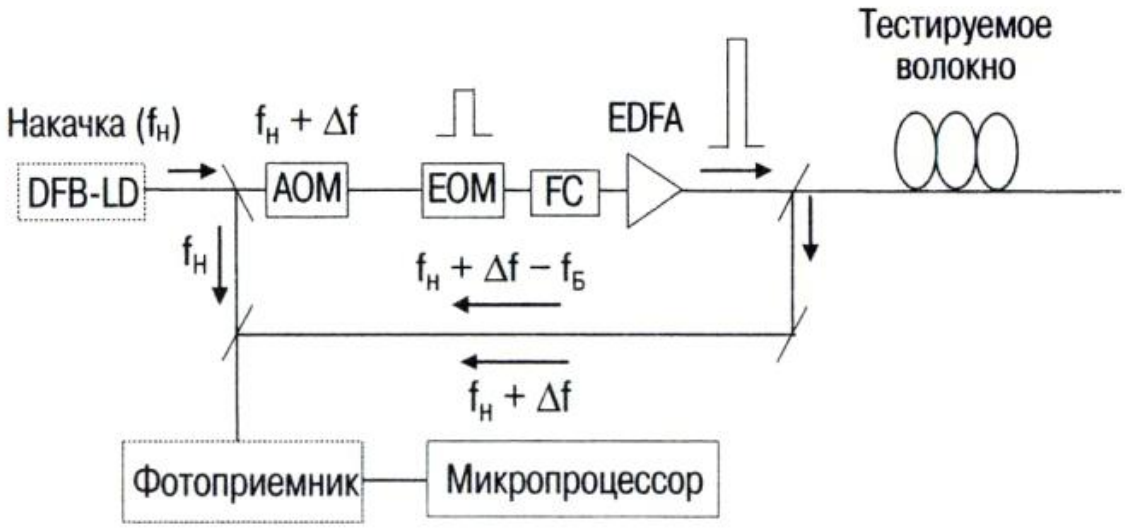


Рис. 4.17. Оптическая схема бриллюэновского рефлектометра (BOTDR)

Спектр обратной волны, рассеянной в волокне, содержит релеевскую компоненту (частота которой равна частоте накачки ($f_н + \Delta f$)) и две бриллюэновские (стоксову и антистоксову). Стоксова компонента смещена по частоте вниз ($f_н + \Delta f - f_Б$), а антистоксова вверх ($f_н + \Delta f + f_Б$) (рис. 4.11). Для выделения нужной компоненты (обычно стоксовой как более мощной) используется когерентный прием излучения. Для этого часть мощности излучения DFB лазера ответвляется непосредственно на вход фотоприемника, где оно смешивается с излучением рассеянным в волокне.

Когерентный прием позволяет не только выделить стоксову компоненту в спектре обратной волны, но и увеличить чувствительность фотоприемника до величины, близкой к квантовому пределу. В BOTDR необходимы более чувствительные фотоприемники, чем в OTDR, так как коэффициент спонтанного бриллюэновского рассеяния ($\alpha_Б \cong 0.03/\lambda^4$, где λ – длина волны излучения в [мкм]) примерно на 14 дБ меньше коэффициента спонтанного релеевского рассеяния ($\alpha_р = 0.75/\lambda^4$). На практике выигрыш по сравнению со схемой прямого детектирования, применяемой в традиционных OTDR, составляет 10...20 дБ.

Смещение частоты рассеянного света $f_Б$, также как и в BODTA, находится путем сканирования частоты акустооптической ячейки Δf. Также как и в BODTA, для каждой частоты накачки $f_н + \Delta f$ снимается рефлектограмма, находится трехмерное распределение спектра спонтанного бриллюэновского рассеяния вдоль волокна и рассчитывается распределение натяжения в волокне. Максимальный сигнал в спектре бриллюэновского рассеяния достигается, когда частота акустооптической ячейки Δf смещена на величину, равную $f_Б$. Если же $\Delta f = 0$, то BOTDR. работает как когерентный импульсный рефлектометр (CO OTDR), выделяя в спектре обратной волны компоненту, обусловленную релеевским рассеянием света в волокне (в последних моделях BOTDR этой опции нет).

Рефлектограмма линии с напряженным участком волокна, полученная при $\Delta f = f_Б$, приведена на рис. 4.18. Удлинение волокна на 0.1 % приводит к смещению частоты основного пика на 490 МГц/% × 0.1 % ≅ 50 МГц. Полная ширина линии в эффекте SPBS (по половинному уровню) для волокна AllWave составляет 86 МГц. Поэтому смещение частоты основного пика бриллюэновского рассеяния в напряженном участке волокна на 50 МГц приводит к заметному уменьшению уровня отраженной мощности и появлению провала в рефлектограмме. Заметим, что изгиб в рефлекгограмме может возникнуть не только из-за натяжения, но и из-за скачка потерь в волокне. Для того, чтобы разделить эти два эффекта, недостаточно измерить рефлектограмму на одной разностной частоте, как на рис. 4.18, а необходимо найти распределение спектра бриллюэновского рассеяния света вдоль волокна.

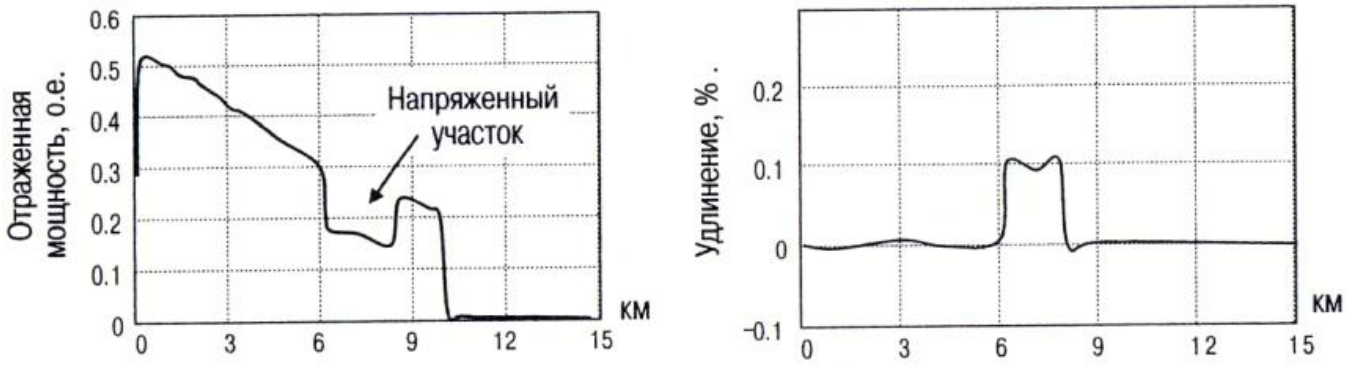


Рис. 4.18. Рефлектограмма волокна AllWave с напряженным участком

Рефлектограммы, полученные с помощью BOTDR, обладают двумя характерными особенностями. Во-первых, в них отсутствуют выбросы сигнала, вызванные отражением импульсов света от оптических разъемов и торца волокна. В традиционных OTDR эти отраженные импульсы приводят к насыщению фотоприемника и появлению мертвых зон (зон нечувствительности). В BOTDR эти импульсы не регистрируются, так как при отражении от оптических разъемов и торца волокна частота света не меняется. В BOTDR регистрируются только те отраженные импульсы света, несущая частота которых смещена на величину $f_Б$.

Во-вторых, не смотря на то, что в BOTDR осуществляется когерентный прием излучения, рефлектограмма не зашумлена, как это должно наблюдаться при когерентном приеме рассеянного излучения. Происходит это потому, что в BOTDR регистрируется свет, рассеянный не на релеевских центрах (замороженных в волокне флуктуациях показателя преломления), а на тепловых флуктуациях показателя преломления (акустических фононах). А так как время жизни акустического фонона ($t_a = 1/\Delta f = 10^{-8}$ сек) мало по сравнению со временем измерений, то амплитуда и фаза волн рассеянных на этих неоднородностях эффективно усредняется.

§ 7. Точность измерения натяжения волокна

Относительная точность при измерении натяжения волокна ограничивается величиной отношения сигнал/шум. Для BOTDR AQ8602 она равна ±0.02 % (при времени усреднения 2^{16}). Абсолютная точность ниже, так как величина $f_Б$ зависит не только от натяжения волокна, но и от степени легирования сердцевины и температуры волокна. Влияние же поперечного давления и скручивания волокна незначительно. Изменение температуры волокна на 10°C, учитывая, что частота рассеянного света изменяется со скоростью порядка 1 МГц/°C (рис. 4.19), приводит к погрешности в измерении натяжения ~0.02%.

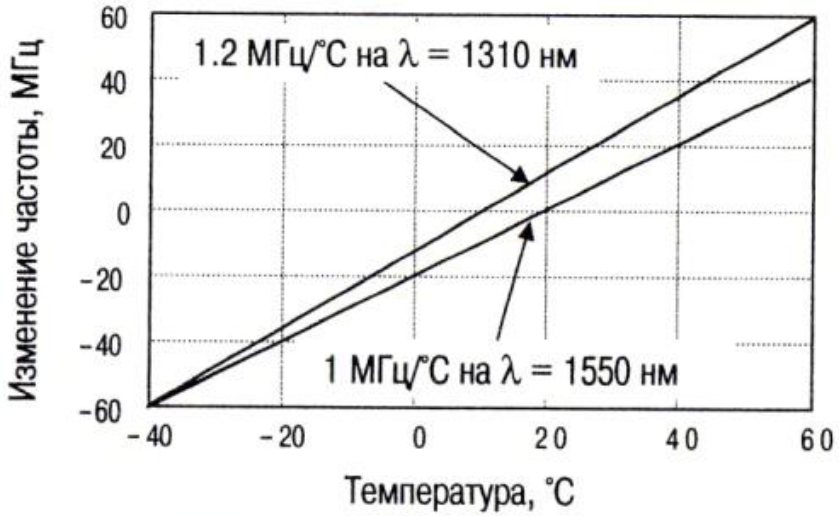


Рис 4.19. Зависимость частоты рассеянного света от температуры волокна

Намного сильнее частота рассеянного света зависит от степени легирования сердцевины волокна. Частоты основного пика у волокон разного типа могут различаться настолько сильно, что в линии, содержащей эти волокна, рефлектограмму можно получить только для одного какого-нибудь одного типа волокна. Так, например, в рефлектограмме линии, состоящей из волокон AllWave и DCF, при $f_o - f = 10.83$ ГГц видно только волокно AllWave, а при $f_o - f = 10.28$ ГГц только волокно DCF (рис. 4.20).

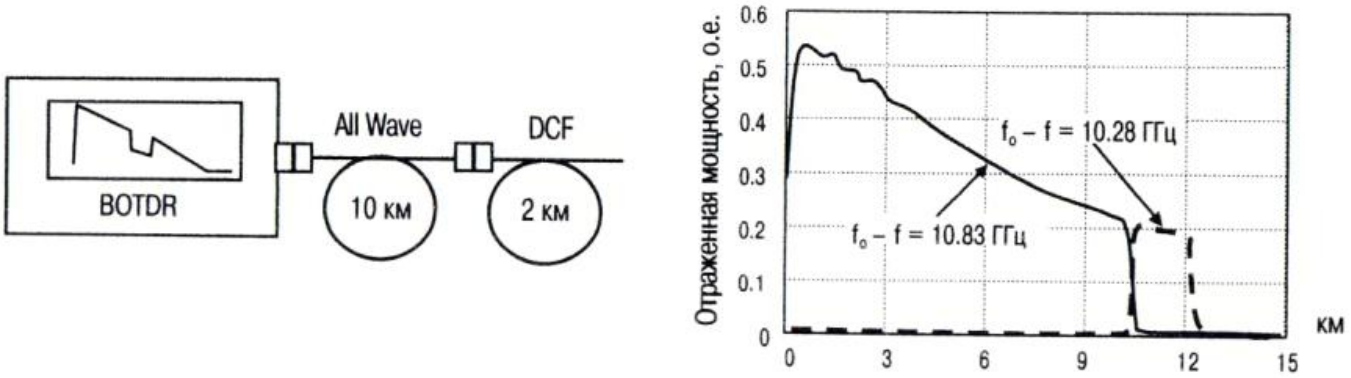


Рис. 4.20. Рефлектограммы линии с двумя различными типами волокон

Спектры бриллюэновского рассеяния на $\lambda = 1552$ нм для волокон AllWave (стандартное одномодовое волокно без водяного пика на $\lambda = 1383$ нм) и DCF (одномодовое волокно с большой отрицательной дисперсией) приведены на рис. 4.21. Кроме основного пика в спектре бриллюэновского рассеяния наблюдаются также небольшие дополнительные пики (см. таблицу № 4.1).

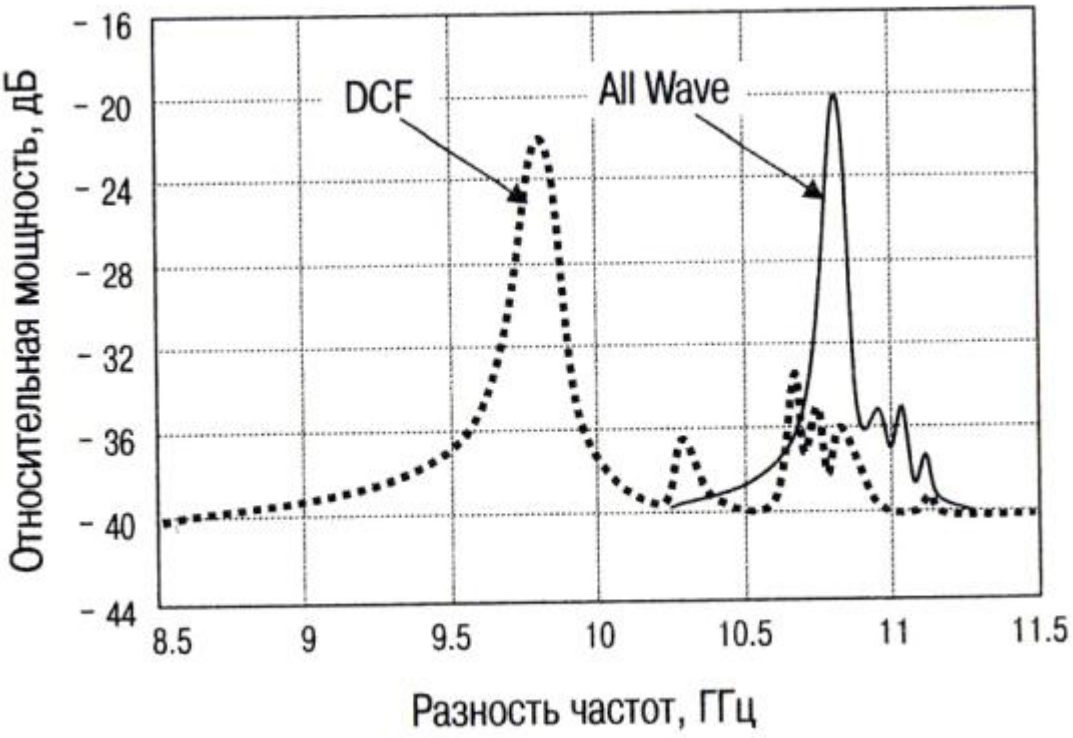


Рис.4.21. Спектры SPBS в волокнах AllWave и DCF на $\lambda = 1552$ нм

Дополнительные пики в спектре бриллюэновского рассеяния возникают из-за того, что звуковая волна распространяется не в безграничной среде, а в слоистом цилиндрическом стержне, образованном оболочкой и сердцевиной волокна. Значения частоты основного и дополнительных пиков могут быть использованы для определения типа волокна.

Частоты основного пика бриллюэновского рассеяния $f_{Б0}$ для волокон AllWave и DCF различаются, как видно из рис. 4.21, примерно на 1 ГГц. Такое же смешение частоты

(учитывая, что $K = \frac{f_Б - f_{Б0}}{\varepsilon} \cong 0.5\ \frac{\text{ГГц}}{\%}$) вызывает удлинение волокна на 2 %. Для волокон AllWave и TrueWave частоты основного пика $f_{Б0}$ различаются примерно на 70 МГц (см. таблицу № 4.1), что соответствует удлинению волокна на 0.14 %. Отсюда следует, что так как предельно допустимая значение удлинения волокна меньше 0.25...0.3%, то при измерении натяжения волокон в линии передачи, где уложены волокна разного типа, необходимо вводить поправку на смещение частоты основного пика.

Таблица №4.1. Частоты основного и дополнительных пиков в спектре спонтанного бриллюэновского рассеяния на λ = 1552 нм

Тип волокна	Основной пик, ГГц	2-ой пик, ГГц	3-ий пик, ГГц	4-ый пик, ГГц	5-ый пик, ГГц
AllWave	10.83	10.95	11.05	11.20	–
TrueWave	10.70	10.82	10.90	–	–
DCF	9.77	10.28	10.68	10.78	10.89

В волокнах одного типа вариации $f_{Б0}$ вызваны, в основном, вариациями показателя преломления и скорости звука в волокне, возникающими из-за флуктуации степени легирования сердцевины волокна. Для SM волокон одной производящей компании это различие составляет около 10 МГц ($\Delta\varepsilon \sim 0.02\%$), а для SM волокон разных компаний около 20 МГц ($\Delta\varepsilon \sim 0.04\%$) (рис. 4.22).

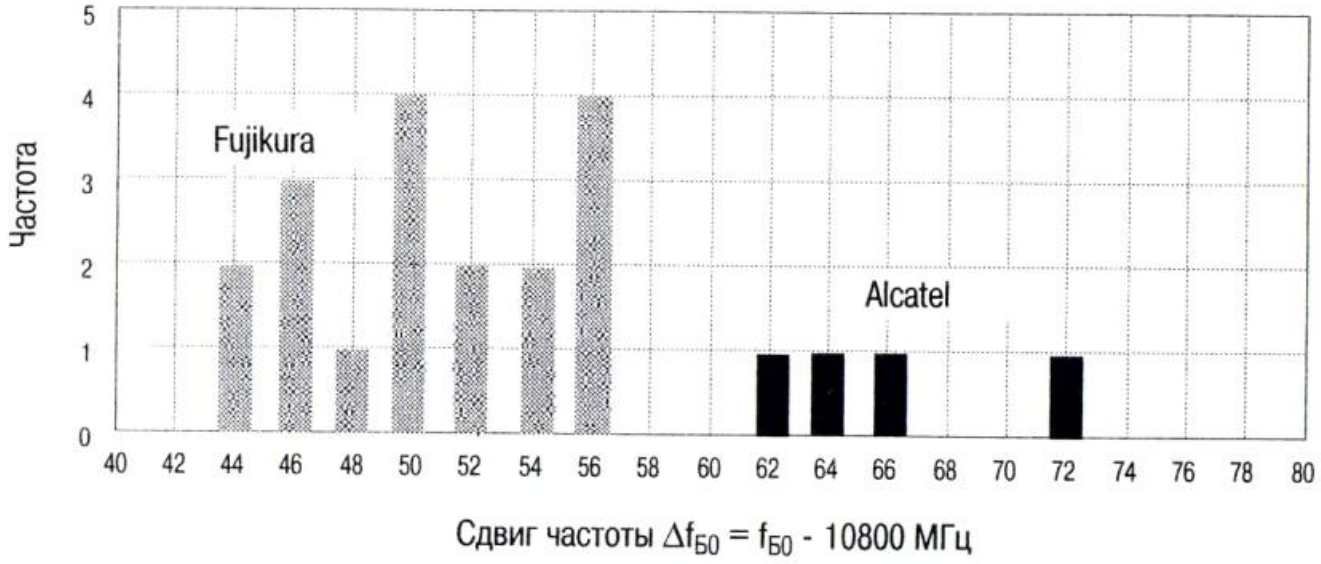


Рис. 4.22. Гистограмма распределения сдвига частоты бриллюэновского рассеяния стандартных одномодовых волокнах компаний Fujikura и Alcatel

Таким образом, относительная погрешность при измерении натяжения волокон (±0.02%) ограничивается шумами BOTDR, а абсолютная погрешность (~0.05%) – и неопределенностью температуры волокна, и нерегулярностью параметров волокна.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В.* Оптические волокна для линий связи, М.: ЛЕСАРарт, С. 288, 2003
2. *Anderson, D.R, Johnson, L., Bell, F.G.* Troubleshooting Optical-Fiber Networks, (Understanding and using your OTDR), Second Edition, Elsevier Academic Press, P. 437, 2004
3. *Фриман Р.*, Волоконно-оптические системы связи, М.: Техносфера, С. 441, 2003
4. *Воронцов А.С., Турин И.О, Мифтяхетдинов С. Х., Никольский К.К., Питерских С.Э.*,Оптические кабели связи российского производства. Справочник, М.: Эко-Трендз, С. 288, 2003
5. Optical Fiber Telecommunications, Vol. IVA,B, ed. By LP. Kaminow and Li Tingye, Aca-demic Press, P. 876, P. 1022, 2002
6. *Yeniay A., Delavaux J-M., Toulouse J.*, "Spontaneous and Stimulated Brillouin Scattering Gain Spectra in Optical Fiber", J. Lightwave Tech., Vol. 20, № 8, p. 1425-1431, 2002
7. Волокнная оптика. Сб. статей, Оптиктелеком, М.: Изд. "ВиКо", С. 158, 2002
8. *Мальке Г., Тёссинг П.* Волоконно-оптические кабели. Основы. Проектирования кабелей. Планирование систем. Corning Cable Systems, С. 351, 2001
9. *Жирар А.*, Руководство по технологии и тестированию систем WDM, Пер. с англ. Под ред. А.М. Бортникова, У.У. Убайдуллаева, А.В. Шмалько, М.: EXFO, С.194, 2001
10. *Классен К. Б.* Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике, М.: Постмаркет, С. 352, 2000
11. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы, Сб. статей под ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. М.: Изд. "Connect", С. 367, 2000
12. *Убайдуллаев Р.Р.*, Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз, С. 267, 2000
13. *Komachiya M*, *et all*, "Proof-testing and probabilistic lifetime estimation of glass fiber for sensor applications", Appl. Opt., Vol. 38, № 13, p. 2767-2774, 1999
14. *Иванов А.Б.* Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения, М.: Изд. Syrus. Systems, С. 672, 1999
15. *BellerJ.*, "OTDRs and Backscatter Measurements", Ch. 11, in Fiber Optic Test and Measurement, Ed. Derickson D., Prentice Hall PRT, 1998
16. *Lafferiere J., Taws R., Wolszezak S.*, Guide to Fiber Optic Measurements, Wavetek, 1998
17. *Семенов А. Б.* Волоконная оптика в локальных и кооперативных сетях связи, М.: КомпьютерПресс, С. 307, 1998
18. *Семенов С.Л.*, Физические процессы, определяющие прочность и долговечность волоконных световодов, Канд. Дисс, ИОФАН, 1997
19. *Агравал Г.* Нелинейная волоконная оптика: Пер. с англ. / Под ред. П.В.Мамышева. М.: Мир, С. 324, 1996
20. *Kurashima Г., Horiguchi T., Izumita H, Furukawa S.*, "Brillouin Optical-Fiber Time Do-main Reflectometry", IECE Trans. Commun., Vol., E76-B, p. 382-389, 1993
21. *Agraval G.P.* Fiber-Optic Communication Systems. John Wiley, New York, C 541, 1992
22. *Tekippe V.J.*, "Passive Fiber-Optic Components Made by Fused Biconical Taper Proc-ess", Fiber and Integrated Optics, Vol. 9, p. 97-123, 1990
23. *Horiguchi T., Tateda M.* BOTDA - Nondestructive Measurement of Single-Mode Optical Fiber Attenuation Characteristics Using Brillouin Interaction: Theory, J. Lightwave Tech., Vol. 7, № 8, p. 1170-1176, 1989
24. *Kapron F., Adams B., Thomas E., Peters J.*, "Fiber-Optic Reflection Measurements Using OCWR and OTDR Techniques", J. Lightwave Tech., Vol. 7, № 8, p. 1234-1241, 1989
25. *Danielson B.*, "Optical time-domain reflectometer specifications and performance testing", Appl., Optics, Vol. 24, № 15, p. 2313-2321, 1985
26. *Као С. К.*, "Волоконные световоды и кабели", Гл. 5, с. 155-204, в сб. "Волоконно-оптическая связь", под ред. М. Дж. Хауса и Д. В. Моргана, М.: "Радио-связь", С. 270, 1982

Приложение А

А1. Сварные соединения волокон

На одну строительную длину оптического кабеля приходится примерно одно сварное соединение волокон и таких соединений на всем регенерационном участке линии передачи, учитывая большое число волокон в кабеле, может быть несколько сотен. Поэтому к качеству соединений волокон в линии передачи предъявляются очень высокие требования, так как от них зависит не только величина полных потерь в линии передачи, но и срок службы этой линии. Например, максимальные потери в соединении одномодовых волокон, по спецификациям РОСТЕЛКОМА, не должны превышать 0.05 дБ (на λ = 1550 нм).

Наиболее высокое качество соединений волокон достигается при их сварке. Средние потери в сростках одномодовых волокон составляют около 0.02 дБ, а прочность сростков волокон такова, что при прикладывании к волокну разрушающей нагрузки сросток волокон чаще всего остается целым. Однако для того, чтобы добиться столь малых потерь в месте соединения волокон смещение сердцевин волокон друг относительно друга (d) не должно превышать десятых долей длины волны. Так, например, при $d \cong 0.3\lambda$, $w \cong 7\lambda$ и $\Delta w = 0$ с помощью формулы (1.1) получаем оценку: α_d(дБ) = 0.01 дБ.

Создание сростков волокон с малыми потерями сильно осложняется из-за наличия эксцентриситета между сердцевиной и кварцевой оболочкой. Как видно из таблицы № 1.4, оси сердцевин волокон могут быть смещены относительно осей кварцевой оболочки примерно на 0.5 мкм. При сварке волокон силы поверхностного натяжения стремятся совместить оси оболочек и развести (при наличии эксцентриситета) оси сердцевин волокон (рис. А.1а). Поэтому, если не производить коррекцию эксцентриситета, то сердцевины волокон в сростках могут быть смещены друг относительно друга на величину порядка 1 мкм. Потери при таком смещении получаются очень большими: α_d(дБ) $\cong$ 0.16 дБ (при d = 1 мкм, w = 10 мкм и $\Delta w = 0$).

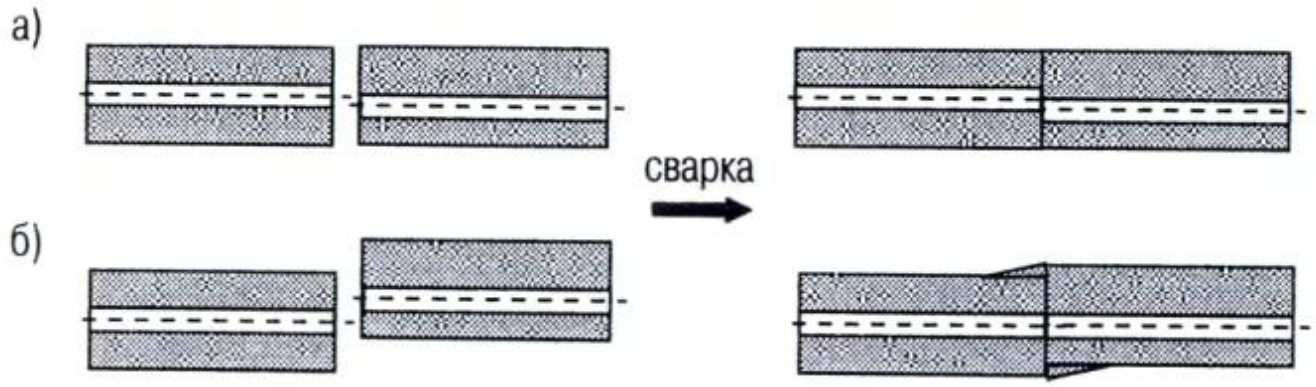


Рис. А. 1. Сварки волокон обладающих эксцентриситетом (а) без коррекции (б) с коррекцией эксцентриситета

Юстировка волокон в сварочных аппаратах осуществляется по их изображению и по интенсивности света, проходящего через место соединения волокон в процессе их сварки (LID - local light injection and detection) (рис. А.2). Достоинством LID системы является то, что в ней осуществляется прямое измерение потерь в месте соединения волокон. В настоящее время эта система используется в сварочных аппаратах фирмы Siemens (Corning). Однако LID система обладает и рядом существенных недостатков, например, высокими требованиями к качеству скола торцов волокон, проблемами, возникающими при вводе и вывода света через пластиковую оболочку волокон, а также через кварцевую оболочку со сложным профилем показателя преломления. Поэтому большинство производителей сварочных аппаратов предпочитает осуществлять юстировку волокон по их изображению.

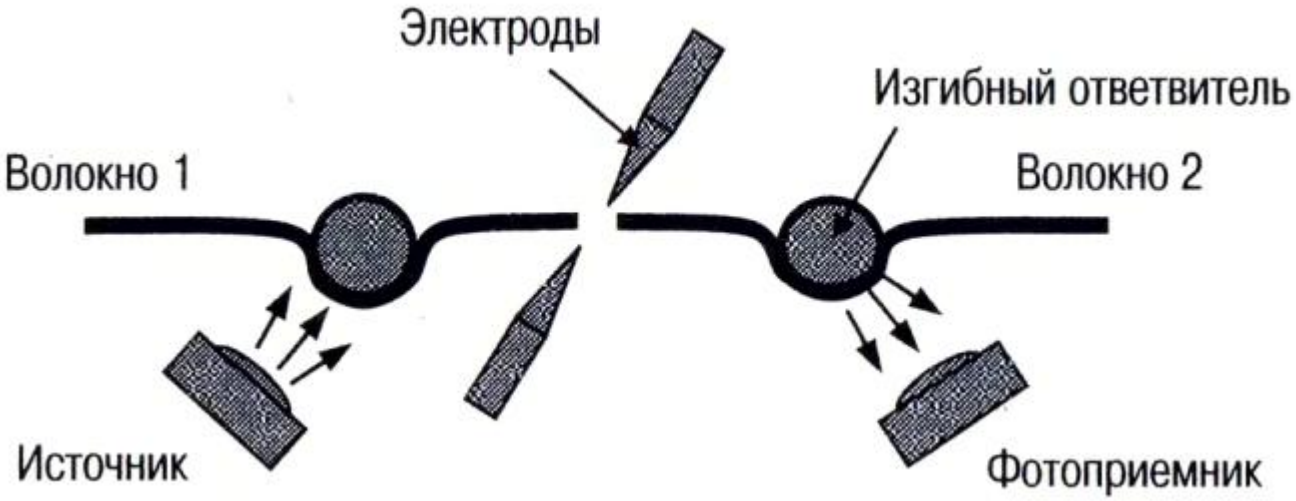


Рис. А.2. Схема юстировки волокон по интенсивности прошедшего света (LID система)

Наибольшее распространение получили система PAS (profile alignment system) и близкая к ней по идеологии система HDCM (high direct core monitoring). Система PAS применяется в варочных аппаратах японских компаний Furukawa S 175 и Fujikura FSM-40S, а система HDCM в аппаратах Sumitomo Type-36 и Type-37. Система PAS используется для грубой юстировки волокон в сварочных аппаратах FSU975 компании Ericson, а прецизионная юстировка в этих аппаратах осуществляется по изображению сердцевин волокон светящихся в дуге электрического разряда.

В PAS системе волокно действует как цилиндрическая линза (рис. А.3). При освещении волокна сбоку пучком параллельного света формируется изображение, в котором видны границы оболочки и сердцевины и, таким образом, содержится информация об эксценриситете соединяемых волокон. Программное обеспечение позволяет расшифровать полученное изображение, смоделировать, с учетом типа волокон, процесс их сварки и рассчитать расстояние, на которое надо предварительно развести сердцевины волокон так, чтобы силы поверхностного натяжения совместили их при сварке.

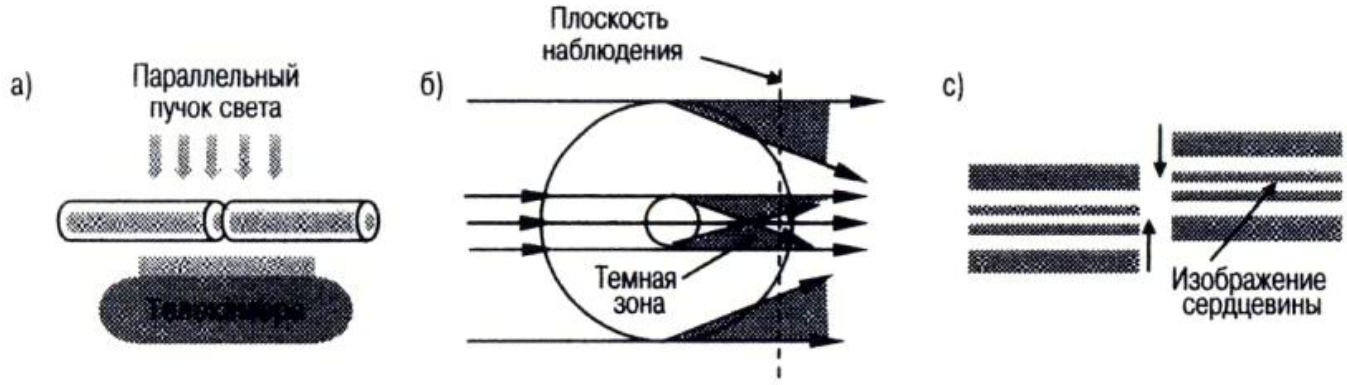


Рис. А.3. Схема юстировки волокон по сердцевине
(а) Схема наблюдения изображения волокон
(б) Схема формирования изображения сердцевины
(с) Изображения волокон на дисплее

Прямое измерение потерь непосредственно с помощью сварочного аппарата возможно только при использовании LID системы. При юстировке волокон по их изображению потери в сростках волокон не измеряются, а производится только оценка величины этих потерь. При этом достаточно точную оценку потерь в сростках волокон удается получить при условии, что используются волокна высокого качества и сварочные аппараты с развитым программным обеспечением. В последних моделях сварочных аппаратов, например TYPE-37, за счет учета всех основных факторов, влияющих на величину

потерь в сростках волокон, удалось добиться того, что оцененные потери практически совпадают с истинными потерями (рис. А.4).

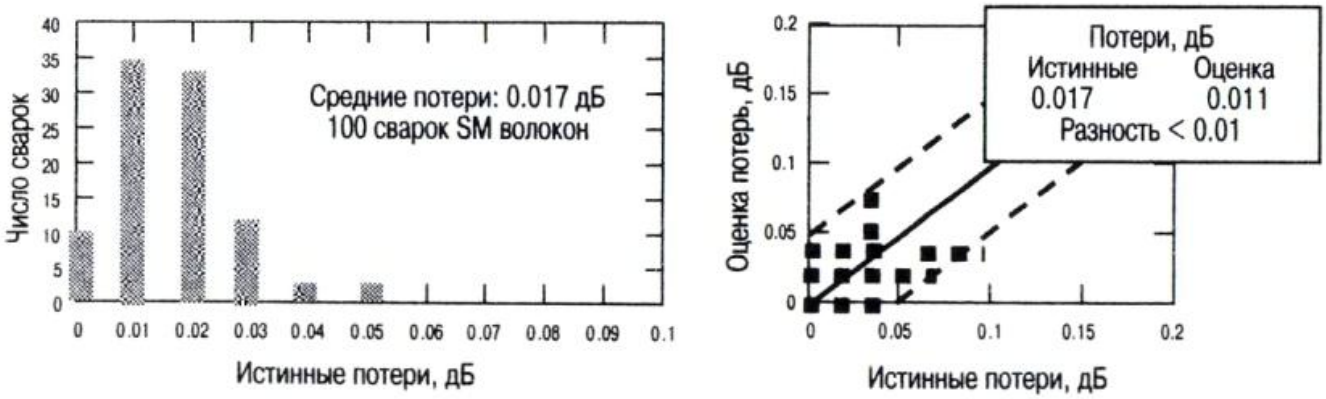


Рис. А.4. Сравнение «истинных» потерь в сростках SM волокон с оценкой потерь получаемой с помощью PAS системы

Как уже говорилось, программное обеспечение сварочного аппарата позволяет расшифровать изображение, полученное с помощью PAS системы, и определить тип волокна. Зная тип волокна, оператор всегда может выбрать в памяти аппарата соответствующий режим сваривания волокон. Заметим, что распознать тип волокна непросто. Например, трудно отличить даже одномодовое волокно от многомодового. Трудность эта вызвана тем, что размеры оболочек у одномодового и многомодового волокна одинаковые, а их сердцевины без подсветки и достаточно сильного увеличения не видны.

Для создания высококачественного сварного соединения волокон недостаточно установить режим, соответствующий типу свариваемых волокон. Необходимо еще скорректировать мощность дуги и положение, торцевых поверхностей волокон относительно центра дуги с учетом изменения параметров окружающей среды, износа электродов, и разной температурной зависимости вязкости у свариваемых волокон. В последних моделях сварочных аппаратов функция самотестирования осуществляется автоматически, что позволяет, в частности, быстро подобрать нужные параметры при сваривании волокон разных производителей.

При соблюдении всех необходимых технологических условий фирмы, производящие сварочные аппараты, гарантируют среднюю величину потерь в сварном соединении высококачественных SM волокон порядка 0.02 дБ. В чем достаточно просто можно убедится, сваривая SM волокна в лаборатории. Все современные высокоточные сварочные аппараты позволяют быстро и качественно сваривать волокна в полевых условиях при минимальном участии оператора. Величина потерь в создаваемых с их помощью сварных соединениях и прочность этих соединений примерно одинаковы и различаются эти аппараты, в основном, своими эксплутационными характеристиками.

А.2. Ответвители 2x2

Соединять волокна можно не только через торцы, но и через боковые поверхности, как это делается в волоконных ответвителях. Изготовить ответвитель намного сложнее, чем сросток волокон. Поэтому их применяют не для соединения волокон в линии передачи, а используют в качестве пассивных цельноволоконных элементов для разделения или объединения световых потоков на разных длинах волн. Наиболее распространены волоконные ответвители 2×2. Такие ответвители получаются, когда пара волокон, уложенных параллельно друг другу, вытягивается в дуге высокочастотного разряда или пламени кислородно-водородной горелки. При этом участки волокна, находящиеся в горячей зоне, утончаются и сплавляются между собой (рис. А.5).

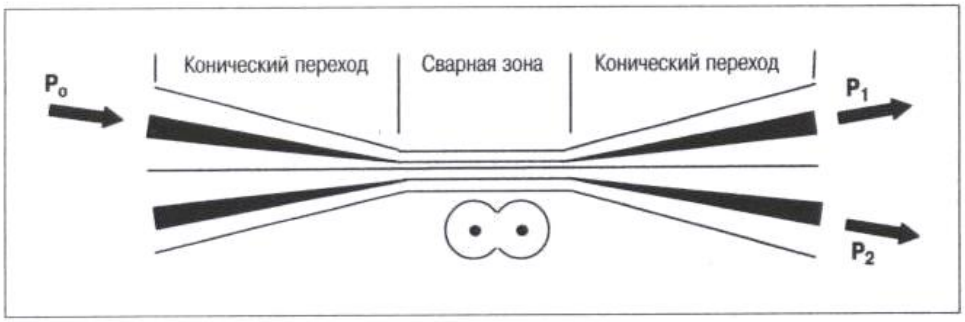


Рис. А.5. Схема сварного ответвителя 2×2

В сварном ответвителе каждое из волокон образует адиабатический биконический переход (рис. А.6). Он представляет собой два пологих конических перехода, между которыми расположена перетяжка. Диаметр перетяжки изменяется при вытяжке ответвителя по экспоненциальному закону: $d = D\exp\left(-\frac{L}{2b}\right)$, где D – диаметр кварцевой оболочки волокна, L – длина вытяжки, b – ширина сварной зоны. Когда диаметр перетяжки уменьшается примерно до 7…5 мкм, мода волокна престает удерживаться сердцевиной волокна и поле волны начинает распространяться частично по воздуху вне перетяжки. Так как волокна в перетяжки ответвителя сплавлены, то мощность излучения начинает перекачиваться из одного волокна в другое.

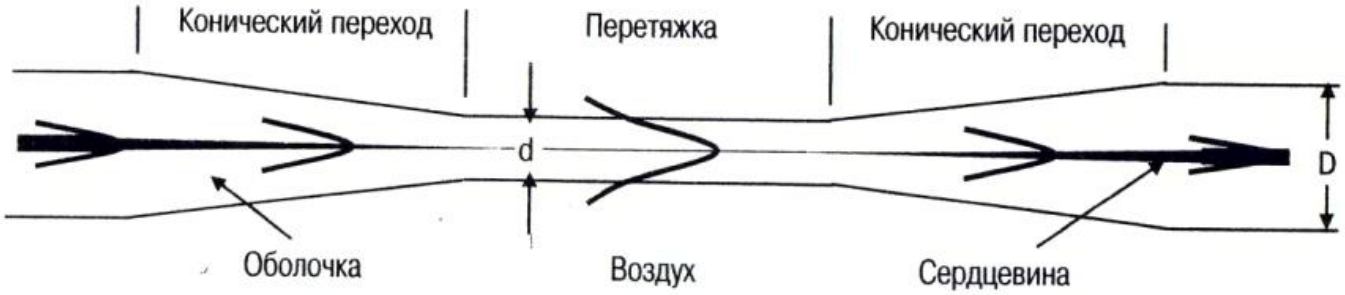


Рис. А.6. Изменение диаметра модового пятна в биконическом переходе

Коэффициент пропускания ответвителя 2×2 изменяется при изменении интегрального коэффициента связи φ по гармоническому закону: $T = \frac{P_1}{P_o} = \cos^2\varphi$. Величина интегрального коэффициента связи экспоненциально увеличивается при увеличении длины вытяжки, что приводит к экспоненциальной зависимости периода коэффициента пропускания от длины вытяжки (рис. А.7).

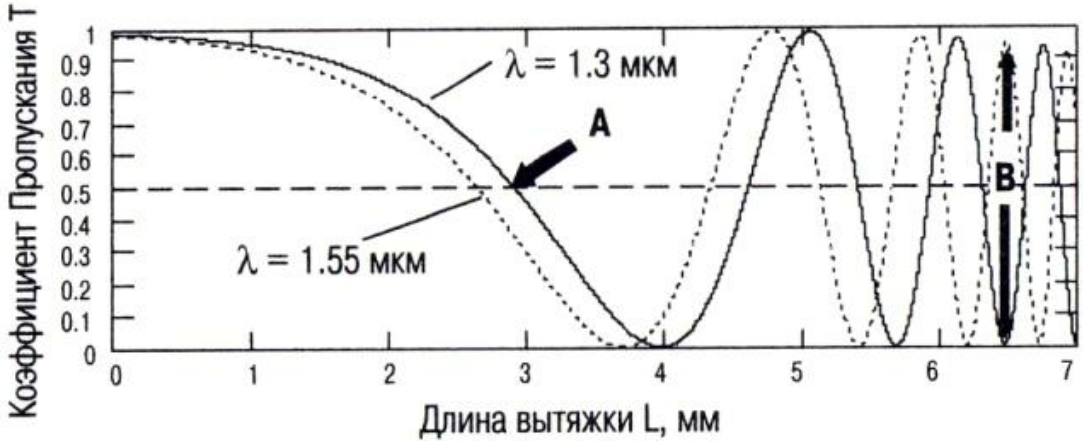


Рис. А.7. Зависимость коэффициента пропускания сильно сплавленного симметричного ответвителя от длины вытяжки

На рис. А.7 представлены зависимости коэффициента пропускания ответвителя от длины вытяжки для двух длин волн 1310 нм и 1550 нм. Стрелками указаны характерные точки при остановке, в которых получаются ответвители с нужными для практических применений характеристиками. Во многих устройствах используются ответвители, которые делят мощность пополам (3 дБ ответвитель). На длине волны 1.3 мкм 3 дБ ответвитель получается, если длину вытяжки остановить в точке А. В этой точке коэффициент пропускания на длине волны 1300 нм равен 50%.

Однако при этой длине вытяжке коэффициент пропускания на длине волны 1550 нм равен примерно 37%, т.е. на длине волны 1550 нм ответвитель уже не делит мощность пополам. Зависимость коэффициента пропускания от длины волны, при условии, что вытяжка остановлена в точке А, показана на рис. А.8. Как видно из этого рисунка, в широком диапазоне длин волн коэффициент пропускания линейно зависит от длины волны. Этот свойство ответвителя используется в цельноволоконном волномере.

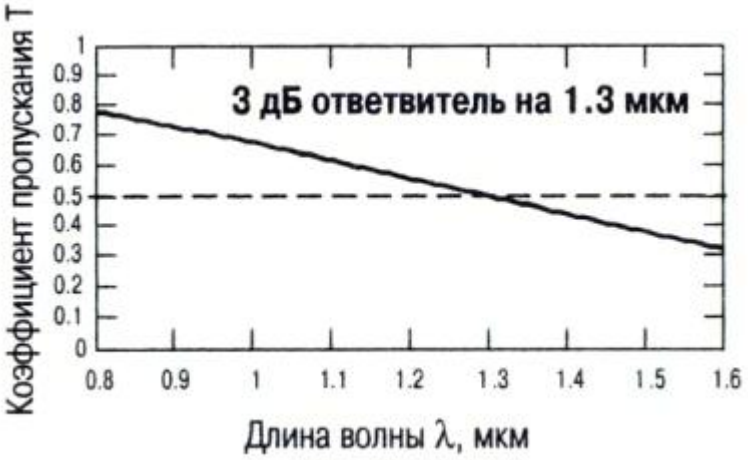


Рис. А.8. Зависимость коэффициента пропускания от длины волны (вытяжка остановлена в точке А)

Другое важное для практики устройство получается, когда втяжка останавливается в точке В (рис. А.7). В этой точке коэффициент пропускания равен 100% на длине волны 1550 нм и 0 на 1310 нм. Такие ответвители применяются в линиях передачи с уплотнением каналов по длинам волн (WDM – wavelength division multiplexing) (рис. А.9).

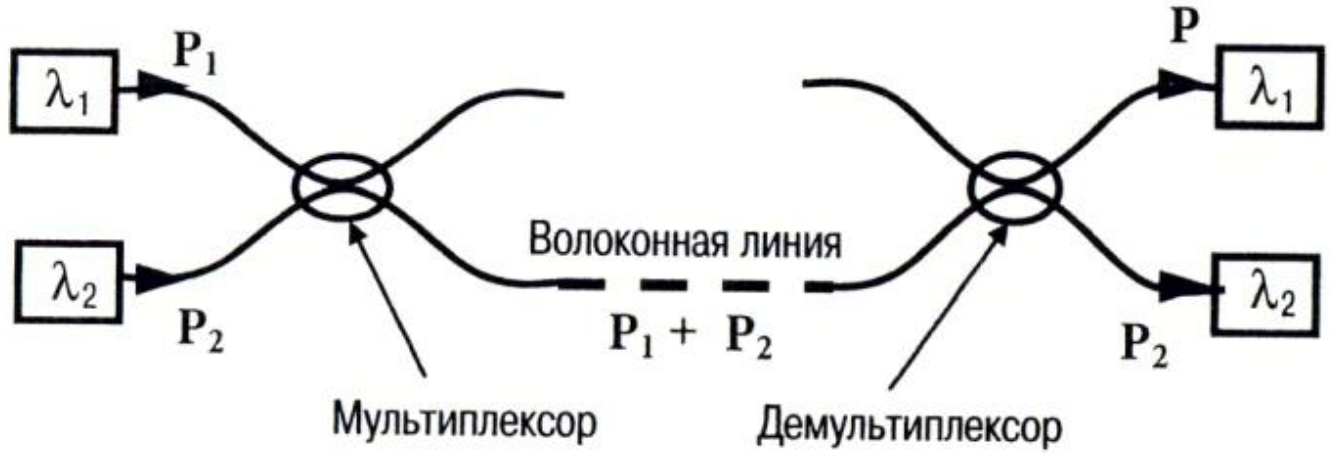


Рис. А.9. Схема уплотнения каналов по длинам волн (WDM).

В ряде систем необходимо ответвить излучение на одной длине волны, а на другой пропустить через ответвитель излучение с близкой длиной волны. Например, в эрбиевом усилителе (EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier), где излучение накачки на $\lambda = 1480$ нм близко к диапазону усиления на $\lambda = 1550$ нм. В рассматриваемой модели ответвителя необходимую для этого спектральную характеристику коэффициента пропускания удается получить при длине вытяжки порядка 8.35 нм (рис. А. 10).

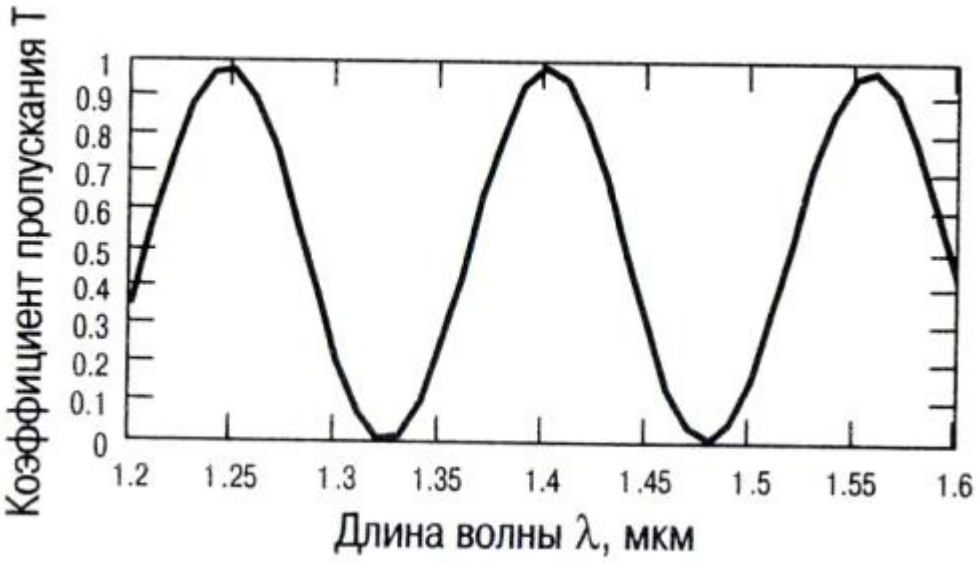


Рис А. 10 Зависимость коэффициента пропускания при большой длине вытяжки

Для создания широкополосных 3 дБ делителей излучения применяются асимметричные ответвители, получающиеся при сплавлении волокон с неравными (примерно на 5…10%) диаметрами кварцевой оболочки. В таких ответвителях имеется возможность получить 50% коэффициент деления в минимуме коэффициента пропускания или, соответственно, в максимуме коэффициента деления R = 1 – T (рис. А.11). На этом же рисунке представлена спектральная характеристика делителя, длина вытяжки которого остановлена в точке, соответствующей максимуму коэффициента деления R = 1 – T ≅ 50%. Как видно из этого рисунка, коэффициент деления в широком диапазоне практически не зависит от длины волны.

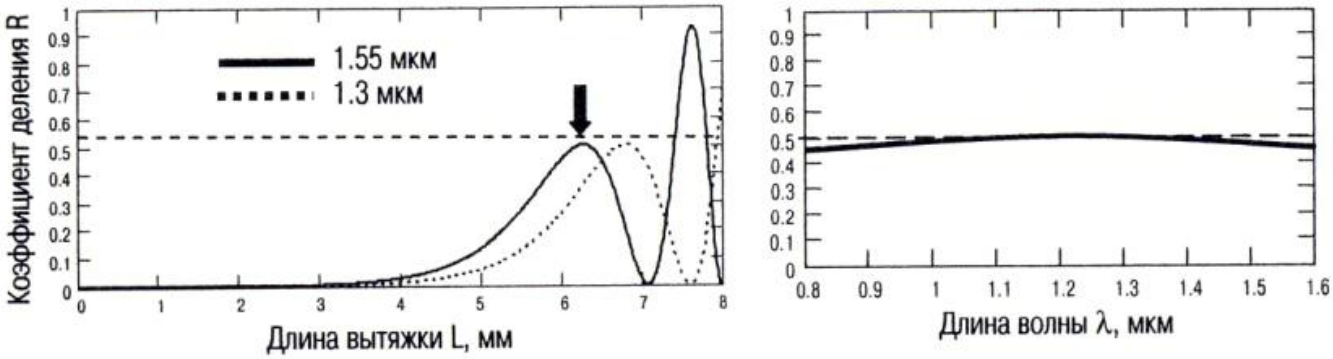


Рис. А.11. Широкополосный делитель на основе асимметричного ответвителя.

До сих пор мы рассматривали сильно сплавленные ответвители, их коэффициент пропускания практически не зависит от состояния поляризации излучения (поляризующая способность таких ответвителей порядка 0.01…0.05). В слабо сплавленных ответвителях зависимость коэффициента пропускания от состояния поляризации излучения более сильная (рис. А. 12). В волоконно-оптических системах такие ответвители используются в качестве поляризаторов и в качестве анализаторов поляризации излучения.

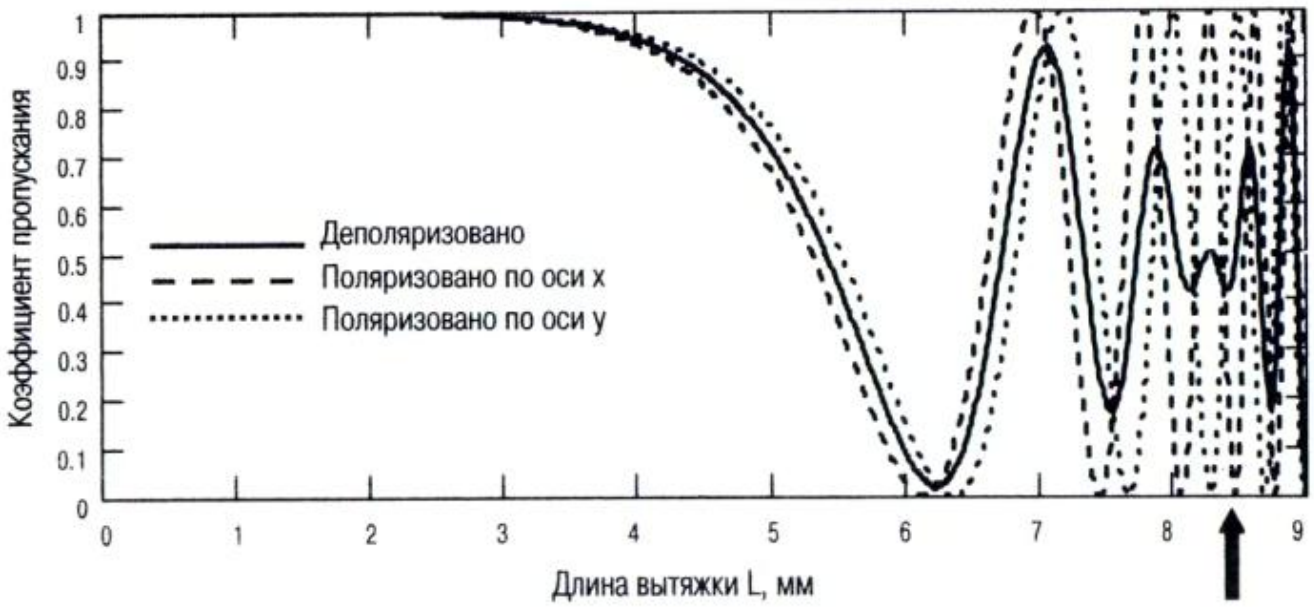


Рис. А.12. Зависимости коэффициентов пропускания слабо сплавленного ответвителя для деполяризованного и поляризованного излучения от длины вытяжки

На рис А. 12. приведены зависимости коэффициентов пропускания для поляризованного и деполяризованного излучения. При длине вытяжки ~5.5 мм поляризующая способность ответвителя равна примерно 0.2. При длине вытяжки, указанной на рисунке стрелкой, ответвитель пропускает одно состояние поляризации и ответвляет другое. Коэффициент экстинкции такого поляризатора ~20…25 дБ.

А.3. Оптические разъемы

Оптические разъемные соединения волокон (их часто называют оптическими разъемами или коннекторами (connectors)) обеспечивают многократные (~500…1000 циклов) соединения/разъединения волокон. На рынке существует большое количество специализированных разъемов в двух типоразмерах: стандартном и миниатюрном. Наиболее распространены три типа стандартных разъемов: FC, ST, SC и шесть типов миниатюрных разъемов: MT-RJ, LC, VF-45, LX-5, Opti-Jack, SCDC-SCQC.

Наиболее высокие требования к качеству разъемов предъявляются при соединении одномодовых волокон, где в основном используются стандартные разъемы типа: FC, ST, SC. Разъемы типа FC ориентированы на применение в линиях дальней связи и в сетях кабельного телевидения. Это единственный тип разъема, рекомендованный для применения на подвижных объектах, так как он лучше других выдерживает вибрацию и удары.

Основным недостатком FC разъемов является то, что он обеспечивает меньшую плотность монтажа, чем разъемы ST и SC. Для закрепления разъема FC в розетке необходимо закрутить накидную металлическую гайку с резьбой. В тоже время разъем типа ST крепится к розетке с помощью байонетной гайки, а разъем SC еще проще – с помощью пластмассовой защелки. Однако разъемы типа ST и SC обладают менее жесткой конструкцией, чем разъемы типа FC и рекомендованы только для стационарных объектов. Минимальную же плотность монтажа (почти в 2 раза меньшую) обеспечивают миниатюрные разъемы. Среди них на сегодняшний день наиболее популярны разъемы MT-RJ и LC. Они применяются преимущественно с многомодовыми волокнами в локальных вычислительных сетях, где особенно велика потребность в увеличении плотности монтажа.

Рассмотрим более подробно конструкцию разъемного соединителя для FC разъемов. В ней содержатся все принципиально важные решения, используемые в соединителях с разъемами другого типа. Конструктивно разъемный соединитель представляет собой два разъема и соединительную розетку. Оптические волокна вклеены в керамические наконечники разъемов диаметром 2.5 мм (в миниатюрных разъемах диаметр наконечника

1.25 мм). Разъемы центрируются в розетке с помощью плавающего центратора в виде разрезной втулки из керамики для одномодового волокна или из бронзы для многомодового волокна. Наконечники разъемов прижимаются друг к другу в центраторе с помощью пружин и, таким образом, место соединения волокон механически развязано относительно корпуса розетки. Фиксация разъемов в розетке может быть резьбовой (FC), байонетной (ST) и замковой (SG).

Торцевые поверхности волокон в оптических разъёмах имеют сферическую форму с радиусом закругления 10…25 мм для PC разъёмов (PC – Physical Contact) и 5…12 мм для APC разъемов (APC – Angled Physical Contact). В соединенном состоянии торцы стыкуемых наконечников прижимаются друг к другу с определенным усилием (обычно 8…12 Н). Возникающая при этом эластичная деформация наконечников приводит к появлению оптического контакта (рис. А. 13).

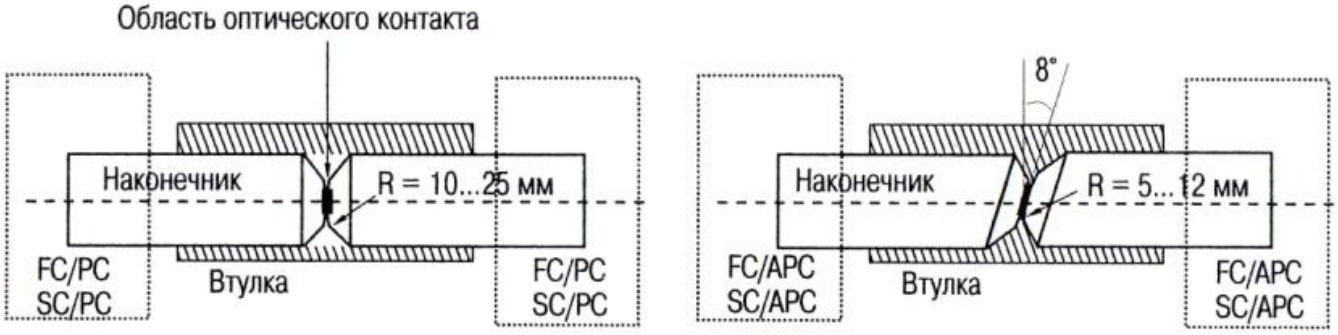


Рис. А. 13. Схема образования оптического контакта в месте соединения наконечников разъемов PC и APC.

Две поверхности считаются находящимися в оптическом контакте, если расстояние между ними много меньше длины волны света. При этом чем меньше расстояние между этими поверхностями, тем меньше будет и величина отраженного от них света. Качество оптического контакта определяется качеством шлифовки и последующей полировки торцевой поверхности волокон. Для PC разъёмов ETSI рекомендует величину коэффициента френелевского отражения от места оптического контакта менее – 35 дБ. Стандартная шлифовка, как правило, обеспечивает – 40 дБ.

Многие поставщики оптических коммутационных шнуров предлагают разъёмы со специальной шлифовкой, обеспечивающие коэффициент отражения менее – 55 дБ. Это так называемые разъёмы Супер- и Ультра-PC. На практике такая шлифовка оказывается бесполезной, так как буквально после нескольких подключений коэффициент отражения увеличивается до величины, свойственной обычному PC разъёму. Происходит это из-за неизбежного появления пыли и микроцарапин на торцевых поверхностях разъёмов.

Поэтому, когда требуется коэффициент отражения не хуже — 55 дБ, разумнее использовать APC разъемы. В APC разъёмах нормаль к контактной поверхности наклонена к оси наконечника под углом 8° (рис. А. 13). В такой конструкции коэффициент отражения не превышает — 60 дБ как в соединенном, так и в разъединенном состоянии. В соединенном состоянии типичным является значение от –70 до –80 дБ.

Таким образом, в PC и APC разъёмах только ничтожно малая часть излучения отражается от места соединения торцов волокон. Поэтому потери, вызванные отражением света, пренебрежимо малы. Если пренебречь так же потерями, возникающими из-за дефектов на торцах волокон, то основной причиной, вызывающей потери в месте соединения разъемов, является смещение сердцевин соединяемых волокон относительно друг друга вследствие эксцентриситета (неконцентричности) как самих волокон, так и деталей крепления разъёма (рис. А.14).

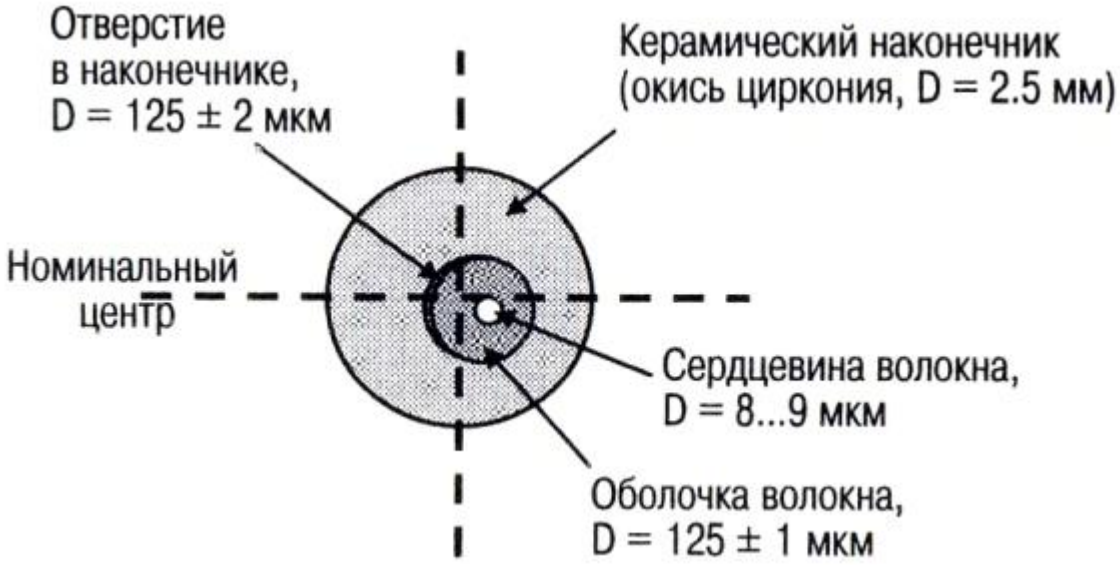


Рис А. 14. Сложение разных видов неконцентричности в наконечнике.

Оценим допустимую величину смещения сердцевин волокон исходя из того, что потери в разъемах, в соответствии рекомендациями ETSI, не должны превышать 0.5 дБ. Зависимость этих потерь от величины смещения сердцевин d описывается формулой: α_d(дБ) = 4.34 (2 d/w)^2. Учитывая, что диаметр модового поля w ≈ 10 мкм, получаем, что величина смещения сердцевин друг относительно друга должна быть меньше 1.7 мкм.

Потери принято относить к одному определенному разъёму (несмотря на то, что измеряемой величиной являются потери в месте соединения двух разъемов). Так можно делать, когда потери в месте соединения разъемов обусловлены только смещением сердцевин волокон и один разъём при этом образцовый (его также называют материнским или мастер-разъёмом). Образцовый разъем А выделен среди других разъёмов тем, что в нем ось сердцевины волокна совпадает с номинальным центром разъёма (рис. А. 15).

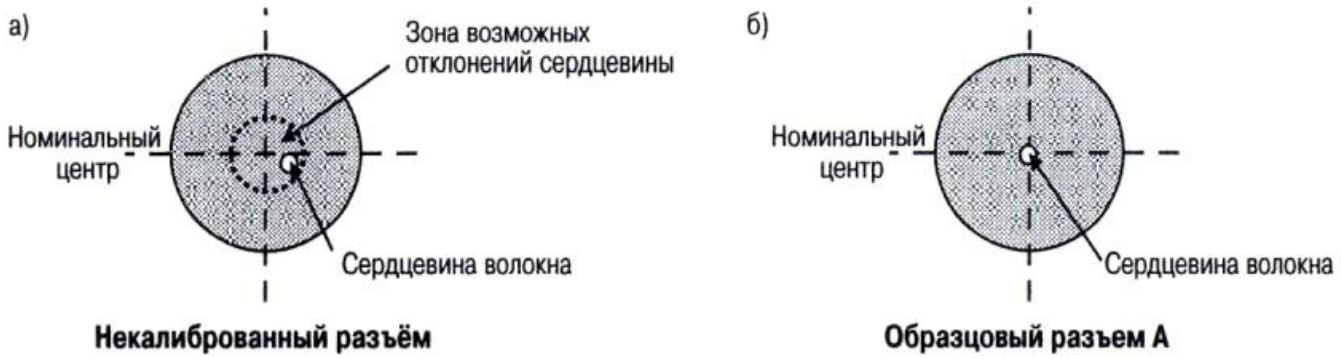


Рис. А. 15. Местоположение сердцевины волокна в наконечниках:
(а) – в типовом (некалиброванном) разъёме и (б) – в образцовом разъеме А.

Все измерения при изготовлении оптических шнуров выполняются только относительно образцового разъёма. Данные именно этих измерений и указываются в каталогах всех производителей, а также на упаковке готовых изделий. Но при использовании оптических шнуров типовой разъём стыкуется не с образцовым разъёмом, а с таким же типовым разъемом (любой с любым). В таких соединениях смещения сердцевин получаются больше почти в 1.5 раза, а потери (в дБ) увеличиваются при этом примерно в 2 раза (рис. А. 16).

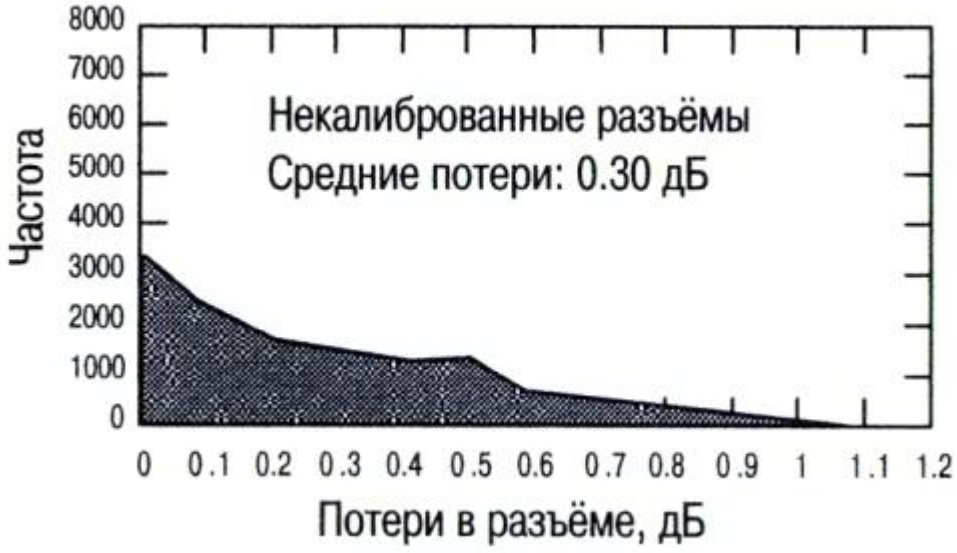


Рис. А. 16. Гистограмма распределения потерь, вносимых при соединении типовых (некалиброванных) разъемов (любого с любым).

Для компенсации негативного влияния эксцентриситета применяются различные способы регулировки (настройки) разъемов. Наибольшее распространение получила технология, в которой используется образцовый разъём Б (со смещенной сердцевиной волокна). В образцовом разъёме Б сердцевина волокна смещена относительно номинального центра (параметры оговорены в спецификации IEC) примерно на половину радиуса зоны возможных отклонений сердцевины (рис. А. 17).

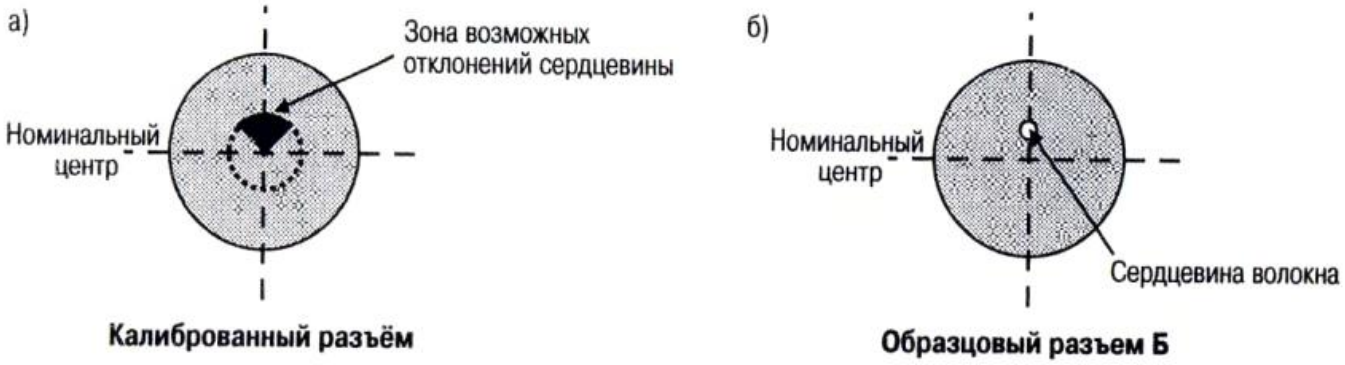


Рис. А. 17. Местоположение сердцевины волокна в наконечниках: (а) – в некалиброванном разъеме и (б) – б образцовом разъеме Б.

Потери в месте соединения наконечников стандартного разъёма и образцового разъема Б, как легко видеть из рис. А. 17, будут изменяться при вращении одного из наконечников вокруг продольной оси. Своих экстремальных значений эти потери достигают в положениях, где совпадают азимуты их сердцевин. Таким образом, имеется возможность при изготовлении разъёма настраивать его на минимум потерь. Для этой цели (только в разъемах типа FC) имеется специальный ключ.

Настройка разъёма осуществляется следующим образом. Вращая изготовленный наконечник вокруг продольной оси, определяют его положение относительно образцового, при котором достигается наименьший уровень вносимых потерь, после чего наконечник фиксируется в корпусе разъёма. Наконечник может быть вставлен в корпус разъема в одном из четырех положений (со смещением вокруг оси на 90°). В результате сердцевина волокна попадает в строго определенный (относительно корпуса разъёма) квадрант торцевой поверхности (рис. А. 17). При соединении откалиброванных таким способом разъёмов (любого с любым) потери получаются в среднем примерно в два раза меньше (рис. А. 18).

Рис.А.18. Гистограмма распределения потерь вносимых при соединении калиброванных разъемов (любого с любым).

Достоинство этого способа настройки разъёмов, кроме эффективного уменьшения потерь (таблица № А.1), заключается также и в том, что используются стандартные наконечники, и что стоимость таких калиброванных разъёмов увеличивается незначительно. Этот способ настройки специфицирован IEC и поддержан большинством крупных производителей, что обеспечивает совместимость и взаимозаменяемость изготавливаемых ими разъёмов.

Таблица № А.1. Потери, вносимые при соединении разъёмов.

Параметр	**Некалиброванные разъёмы**	**Калиброванные разъёмы**
Потери при соединении с образцовым разъёмом, дБ.	Среднее 0.20 94 % < 0.30 97% <0.40	Среднее 0.14 95 % < 0.30 99 % < 0.40
Потери при соединении "любой с любым", дБ	Среднее 0.30 60 % < 0.30 85 % < 0.50 Макс 1.2	Среднее 0.15 94 % < 0.30 98 % < 0.40 Макс 0.71

В настоящее время на телекоммуникационных сетях в Европе наиболее часто применяются некалиброванные разъемы со специфицированным значением вносимых потерь (относительно образцового разъёма) не более 0.5 дБ. Однако поскольку с ростом числа телекоммуникационных сетей возрастает и количество точек соединений, то для снижения величины полных потерь все чаще применяются калиброванные разъёмы.

А.4. Оперативное подключение волокон

При контроле качества оптических кабелей приходится многократно подключать голые (нетерминированные) концы волокон к измерительной аппаратуре с помощью юстировочных столиков или различного рода адаптеров. При этом для того, чтобы не повредить разъем в аппаратуре, в качестве переходного устройства используется оптический шнур или пигтейл. Напомним, что оптический шнур снабжен двумя оптическими разъемами (обычно типа FC или SC), а пигтейл (половина оптического шнура) только одним разъемом.

Котировочные столики позволяют наиболее просто и с минимальными потерями соединять волокна, даже если они обладают несовершенными или сильно различающимися геометрическими параметрами. Это наиболее старый способ соединения волокон, который обычно применяется в исследовательских работах. В свое время это был лучший способ

соединения волокон, и он до сих пор используется на некоторых кабельных заводах. Юстировочный столик состоит из трехкоординатной подвижки, приспособлений для крепления волокон и простейшего микроскопа (рис. А. 19). На первом этапе юстировки используется визуальный контроль, а затем юстировка осуществляется по максимуму сигнала.

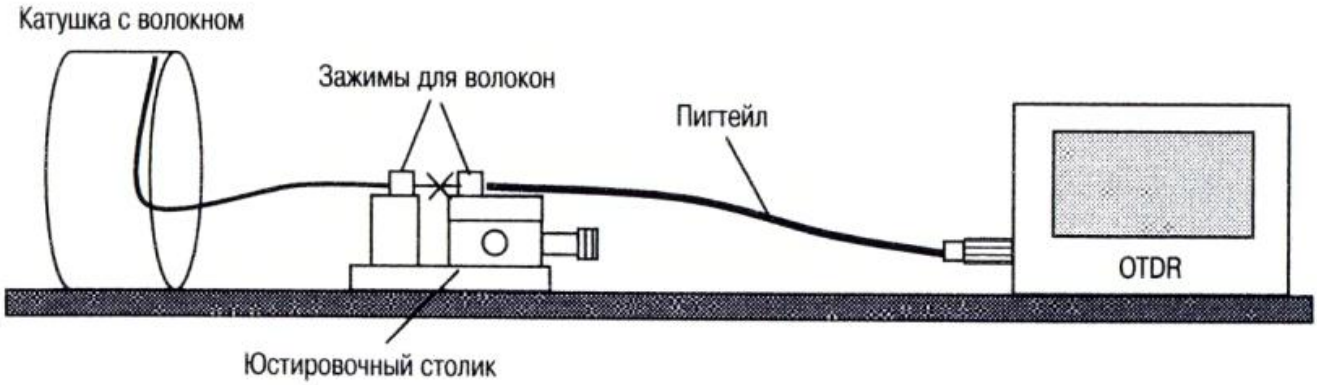


Рис. А.19. Схема подключения к OTDR голых (не терминированных) концов волокон с помощью юстировочного столика и пигтейла.

Основной недостаток этой технологии в том, что необходим квалифицированный оператор, а юстировочный столик имеет большие габариты, хрупкий и дорогой. Время юстировки в зависимости от квалификации оператора составляет 0,5-5мин. При работе на трассе котировочные столики в настоящее время не применяются, прежде всего, из-за того, что они быстро выходят из строя при попадании на них пыли и влаги.

Иногда для соединения волокон используются юстировочные столики сварочного аппарата. В этом случае юстировка волокон может быть выполнена в автоматическом режиме (примерно за 1 мин). В принципе если уж используется сварочный аппарат, то пигтейл можно приварить к тестируемому волокну. Однако стоимость одного сварного соединения достаточно высока. Например, после 1000 сварок обычно необходимо заменять электроды стоимостью ~200$.

При подключении волокон к рефлектометру с помощью юстировочного столика его вибрации могут привести к искажению рефлектограммы. Эти вибрации сказываются наиболее сильно, когда их частота близка к обратной величине времени прохождения импульсов света по волокну. Поэтому необходимо принять соответствующие меры к уменьшению вибраций юстировочного столика, например, установить его на прочное основание, выключить вентилятор в сварочном аппарате и т.д.

Адаптеры предназначены для соединения волокон обладающих совершенными геометрическими характеристиками, так как такие волокна могут позиционироваться с высокой точностью в прецизионных V-образных канавках или в капиллярах. Как видно из таблицы № 1.1, стандартные одномодовые (SM) волокна обладают высокой степенью аксиальной симметрии, а допуск на геометрические параметры кварцевой оболочки и сердцевины меньше 1 мкм.

Применение адаптеров существенно упрощает процедуру подключения нетерминированных концов волокон к измерительной аппаратуре и позволяет значительно уменьшить время, затрачиваемое на контроль качества оптических кабелей. Для этих целей было разработано несколько типов адаптеров, наиболее удобным, на наш взгляд, является адаптер УП-125.

В адаптере УП-125 имеется несколько удачных конструктивных решений, что делает его особенно удобным, когда необходимо обмерить большое количество волокон. В нем для соединения волокон используется открытая сверху V-образная канавка, которая заполняется иммерсирующим гелем с относительно небольшой вязкостью. С одной стороны через направляющий конус в канавку вставляется тестируемое волокно, а с другой стороны вклеен конец волокна от пигтейла (рис. А.20).

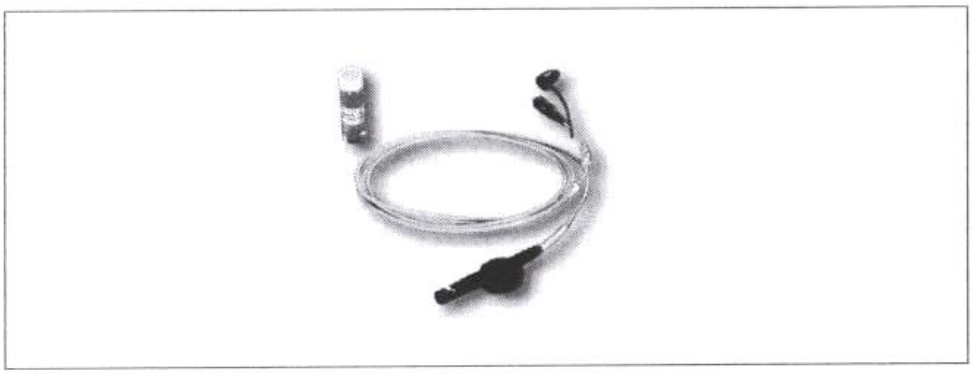


Рис. А.20. УП-125 - устройство для оперативного подключения волокон к измерительному оборудованию.

Открытую канавку значительно проще очистить от грязи и обломков волокон, а использование геля с небольшой вязкостью позволяет легко иммерсировать крупные дефекты на торце волокна. Такая конструкция адаптера обеспечивает малые потери в месте соединения волокон (0.2…0.5 дБ) при предельно низких требованиях к качеству скола волокна (достаточно сломать очищенное волокно руками). Ресурс УП-125 практически неограничен, а время, затрачиваемое на подключение волокна, мало (3-10сек).

Самыми миниатюрными и дешевыми устройствами для соединения волокон являются механические соединители. В них соединение волокон происходит в капилляре, заполненном вязким гелем. Капилляр находится в пластмассовом корпусе имеющим зажимы для крепления волокон. Предназначены механические соединители для ремонта линии передачи (вместо сварки волокон). Их можно использовать вместо юстировочного столика для соединения тестируемых волокон с пигтейлом. Однако число повторных соединений ограничено, в частности, из-за того, что заполнение капилляра относительно вязким гелем возможно только на технологическом оборудовании фирмы производителя.

Адаптеры для соединения с пигтейлом по конструкции близки к механическим соединителям. В них концы волокон вставляются в капилляры и юстируются с помощью эксцентриков, расположенных на концах адаптера (рис. А.21). Максимальное число соединений волокон, которое можно осуществить с помощью адаптера Corning Lab Splice – около 50. Для адаптеров 3M Fibrlock и AMP CoreLink максимальное число соединений равно ~10 и, кроме того, к ним необходимы специальные ключи для зажима волокон.

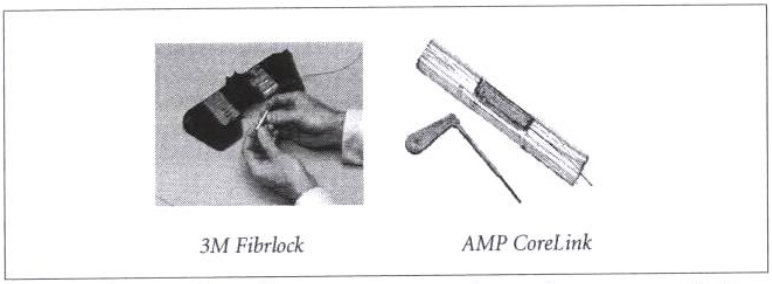


Рис. А.21. Адаптеры для соединения, нетерминированного волокна с пигтейлом.

Адаптеры для соединения с оптическим шнуром конструктивно выполнены так же, как и стандартный оптический разъем с тем отличием, что в капиллярное отверстие в керамическом наконечнике не вклеено волокно и для крепления волокна имеется пружинный зажим (рис. А.22). Волокно вставляется в капилляр и его конец просовывается через капилляр так, чтобы торец оказался примерно в одной плоскости с торцом керамического наконечника. После этого волокно будет фактически оконцовано разъемом с тем отличием, что торец волокна в этом разъеме не отшлифован, а сколот. Время, затрачиваемое на то, чтобы вставить волокно в адаптер равно примерно 1 мин. С помощью такого адаптера волокно можно подключать непосредственно к разъему в измерительной аппаратуре. Однако обычно для того, чтобы защитить разъем в аппаратуре от повреждения концом волокна в адаптере, адаптер подключают через оптический шнур, так как заменить оптический шнур значительно легче и дешевле, чем разъем в аппаратуре.

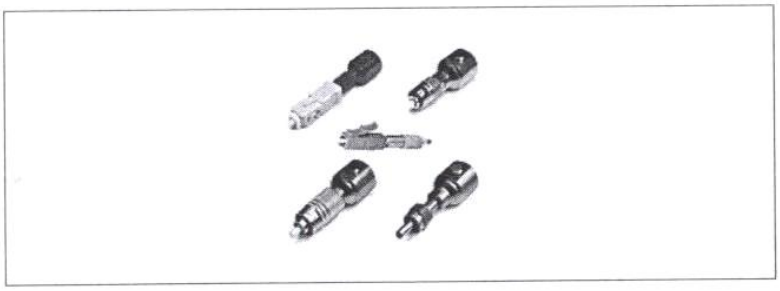


Рис. А.22. Адаптеры для соединения, нетерминированного волокна с оптическим шнуром.

Средние потери вместе соединения адаптера с разъемом (~0.5 дБ) больше чем в месте соединения стандартных разъемов(~0.3 дБ). Избыточные потери возникают из-за того, что сколотое волокно может иметь крупные дефекты, такие, как зубцы или косой скол. Для уменьшения их влияния используют иммерсионную жидкость (гель). Однако для того, чтобы гель не вытекал из адаптера, он должен быть достаточно вязким, но в этом случае не всегда удается иммерсировать крупные дефекты на торце волокна. Другим, существенным недостатком такого адаптера является то, что длинное (~1 см) и узкое (0~127 мкм) отверстие капилляра в наконечнике, куда вставляется волокно, постепенно забивается пылью, гелем, остатками гидрофоба и обломками волокон. Прочистить такой капилляр с помощью специально калиброванных проволочек не всегда удается.

А.5. Технология оконцовывания волокон

Можно выделить четыре технологии оконцовывания волокна: механическая технология с полировкой и без полировки наконечника разъема, клеевая технология и присоединение пигтейла сваркой. Во всех случаях разъемы должны удовлетворять требованиям стандарта ANSI/TIA/EIA-568-B.3.

Наиболее простой является механическая технология оконцовывания волокна без полировки наконечника. В ней применяется специальный разъем, в наконечник которого вклеен короткий отрезок волокна. Вклеенный в наконечник конец волокна, отполирован в заводских условиях, а другой конец этого волокна вставлен в механический сплайс. Все что должен сделать техник для оконцовывания волокна – это снять покрытие с конца волокна, сколоть его торец и зафиксировать волокно в механическом сплайсе разъема. Эта технология хорошо подходит для оконцовывания кабелей с небольшим числом волокон (до 24), а также для ремонта и переконфигурирования СКС. Подготовка к установке разъемов занимает мало времени и не требует сложного оборудования, а на саму установку разъема затрачивается меньше 1 минуты. Ее недостаток в том, что требуется специальный разъем с механическим сплайсом на конце, а также в том, что использование механического сплайса не самый надежный способ соединения волокон.

При механической технологии оконцовывания волокна с полировкой наконечника в разъеме нет механического сплайса, и не требуется использование эпоксидного клея, так как волокно в наконечнике разъема фиксируется путем обжима наконечника. После того как волокно зафиксировано в наконечнике его торец шлифуется и полируется. Эта технология хорошо подходит для оконцовывания кабелей со средним числом волокон (от 24 до 48) и для построения сетей с магистральными каналами и каналами, идущими до рабочих мест пользователя. Подготовка к установке разъемов занимает около 5 мин, а установка одного разъема – около 2 мин. Применяют эту технологию на тех предприятиях, где имеется постоянный и высококвалифицированный технический персонал.

Клеевая технология обеспечивает получение минимальных вносимых и минимальных возвратных потерь в месте соединения разъемов. Она хорошо подходят для оконцовывания кабелей с большим числом волокон (> 48). Хотя на установку одного разъема по этой технологии уходит до 25 мин, но при монтаже большого числа разъемов конвейерным методом один разъем устанавливают в среднем за 3…4 мин. Большая экономия времени возникает из-за того, что пока одни разъемы подогревают в печке (сушат эпоксидный клей), другие в это время полируют. Применение быстро отвердевающих клеев

(например, цианокрилатов) существенно сокращает время установки (до 2 мин на разъем) и не требует использования печки. Однако такие клеи стоят дорого, и работать с ними надо очень быстро. Разъемы, устанавливаемые по клеевой технологии с полировкой, самые дешевые на рынке, но чтобы иметь возможность их устанавливать, необходимо купить полировальную машину и печку, клей, наждачную бумагу и жидкости для очистки поверхности разъема. Поэтому эта технология становится экономически эффективной при монтаже большого числа разъемов.

Присоединение пигтейла сваркой часто используется для оконцовывания одномодовых волокон разъемами в транспортных сетях всех уровней: магистральном, уровне распределения и уровня доступа. В распоряжении строителей этих сетей обычно имеется сварочный аппарат и квалифицированные операторы, так как соединение волокон в таких сетях осуществляется обычно путем сварки волокон. На оконцовывание волокон пигтейлом затрачивается мало времени (около 2 минут на подготовку волокон и сварку), при этом параметры оконцованного волокна получаются не хуже, чем при использовании клеевой технологии с полировкой. Поскольку пигтейлы изготавливаются в больших объемах, то стоят они не намного дороже, чем разъемы. Однако в случае применения пигтейла разъем не надо собирать и устанавливать на конце волокна.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(ОБРАЩАЮ ВНИМАНИЕ ЧИТАТЕЛЯ: это приложение не исправлялось после распознавания в виду отсутствия оригинала, поэтому за достоверность данных приведенных ниже ручаться никто не станет!!!)

Спецификации современных моделей оптических рефлектометров

Agilent E6000C Mini-OTDR
Портативный мини-рефлектометр
Техническая спецификация
Одномодовые модули Agilent E6001A, Agilent E6003C, Agilent E6003A, Agilent E6004A, Agilent E6008B, Agilent E6012A, Agilent E6013A
Оптические характеристики[1]

Модуль	E6003C					E6003A				E6003B				
Центральная длина волны	1310/1550 ± 25 нм					1310/1550 ± 25 нм				1310/1550 ± 25 нм				
Тип сигнала	одномодовый					одномодовый				одномодовый				
Ширина импульса	10нс	100 нс	1 мкс	10 мкс	20 мкс	10 нс	100 нс	1 мкс	10 мкс	10 нс	100 нс	1 мкс	10 мкс	20 мкс
Динамический диапазон (дБ)[2]	21/20	27/25	33/32	40/39	43/41	19/17	24/22	30/29	35/34	19/17	24/22	30/29	38/37	40/39

Модуль	E6001A				E6004A				E6008B				
Центральная длина волны	1310 ± 25 нм				1310/1550 ± 25 нм				1310/1550 ± 25 нм				
Тип сигнала	одномодовый				одномодовый				одномодовый				
Ширина импульса	10нс	100 нс	1 мкс	10 мкс	10 нс	100 нс	1 мкс	10 мкс	10 нс	100 нс	1 мкс	10 мкс	20 мкс
Динамический диапазон (дБ)	13	18	23	30	13/13	18/18	23/23	30/30	24/22	29/27	35/34	42/41	45/43

Модуль	E6012A					E6013A				
Центральная длина волны	1550±25нм/1625±20нм					1310/1550 ± 25 нм/1625 ± 20 нм				
Тип сигнала	одномодовый					одномодовый				
Ширина импульса	10 нс	100 нс	1 мкс	Юмкс	20 мкс	10 нс	100 нс	1 мкс	Юмкс	20 мкс
Динамический диапазон (дБ)	22/18	27/24	34/30	41/40	43/...	18/17/17	23/22/22	29/28/28	36/35/35	39/38/37

Ширина импульса варьируется для всех одномодовых модулей: 10 нс, 30 нс, 100 нс, 300 нс, 1 мкс, 3 мкс, 10 мкс.
[1] – при температуре 25°C
[2] – стандартный одномодовый сигнал

Разрешающая способность

Модуль	Все одномодовые модули
Мертвая зона неоднородности[3]	3 м, 1,5 м для E6003C
Мертвая зона аттенюации[4]	10 м для 1310 нм, 12 м для 1550 нм, 14 м для 1625 нм 8/10 м на 1310/1550 нм для E6003C

Точность определения расстоянии[5]

Погрешность	Ошибка	Ошибка выборки
±1 м	$\pm 10^{-4}$	±0.5 шага

Точность измерения

Обратное	Отражение[6]
с шагом 1дБ	
±0.05 дБ	±2.0 дБ

Минимальный шаг измерений: 8 см. Модуляция: 270 Гц, 1 кГц, и 2 кГц Ширина импульса: варьируется от 10 нс до 20 мкс.

	E6003A, E6004A, E6003B, E6008B, E6003C, E6001A со встроенным лазерным источником непрерывного излучения
Центральная длина волны	1310/1550 +25 нм
Выходной уровень мощности	–3 дБм
Стабильность[7]	±0.1 дБ
Оптический выход	Пользовательские интерфейсы
Выходной коннектор	дополнительный Diamond HMS-10, FC/PC, DIN 47256, ST, Biconic, SC, NEC D4

Общие характеристики - 21 CFR класс I, IEC825
Класс безопасности лазера - класс 3A.
Температура при эксплуатации - от 0°C до +50 °C.
Температура при хранении - от -40°C до +60°C.
Влажность – 95% R.H. от 0°C до +40°C.
Период повторной калибровки 2 года.
[3] отражательная способность <-35дБ при ширине импульса 10 нс и промежутке < 4 км
[4] отражательная способность <-35дБ при ширине импульса 30 нс и промежутке < 4 км
[5] общая точность расстояния: погрешность смещения + ошибка масштабирования x расстояние + ошибка выборки
[6] –20 дБ до –60 дБ
[7] после 10 мин. разогрева с 15 MHH.@T=constant.

Многомодовые модули Agilent E6005A, Agilent E6009A
Оптические характеристики - 1

Модуль	**E6005A**	**E6009A**
Центральная длина волны	850/1300 ± 30 нм	850/1300 ± 30 нм

Тип сигнала	**Многомодовый 62.5 мкм**				**Многомодовый 62.5 мкм**		
Ширина импульса	10нс	100нс	1мкс	10 мкс	10нс	100нс	1мкс
Динамический диапазон (дБ)[2]	19/17	26/22	(N/A)/28	(N/A)/34	12/12	18/18	(N/A)/23

Разрешающая способность

Модуль	**E6005A**	**E6009A**
Мертвая зона неоднородности[3]	3 м	3 м
Мертвая зона аттенюации[4]	10 м	10 м

Точность определения расстоянии[5]

Погрешность смещения	**Ошибка масштабирования**	**Ошибка выборки**
±1 м	$\pm 10^{-4}$	±0.5 шага выборки

Точность измерения[6]

Обратное рассеивание	**Отражение[7]**
1 дБ шаг	
±0.05 дБ	±2.0 дБ

Минимальный шаг - 8 см.
Модуляция - 270 Гц, 1 кГц, и 2 кГц
Ширина импульса варьируется от 5 не до 100 не (850 нм), от 5 не до 1мкс (E6009A λ=1300 нм), и от 5нс до 10 мке (E6005A λ=1300 нм).

Общие характеристики
Класс безопасности лазера - 21 CFR класс I, IEC825 класс 3A
Температура при эксплуатации - от 0°C до +50°
Температура при хранении - от -40°C до +60°C.
Влажность – 95% R.H. от 0°C до +40°C.
Период повторной калибровки - 2 года

	E6005Д/E6009A со встроенным лазерным источником непрерывного излучения
Центральная длина волны	850/1300 ± 30 нм
Выходной уровень мощности (ЦДВ)	-20 дБм (850нм) -13 дБм (1300 нм)
Стабильность[8]	±0.15 дБ
Оптический выход	Пользовательские интерфейсы
Выходной коннектор	Дополнительный Diamond HMS-10, FC/PC, DIN 47256, ST, Biconic, SC, NEC D4

[2] стандартный одномодовый сигнал
[3] отражательная способность -35дБ при ширине импульса 10 нс и промежутке 4 км
[4] отражательная способность -35дБ при ширине импульса 30 не и промежутке 4 км
[5] общая точность расстояния: погрешность смещения + ошибка масштабирования × расстояние + ошибка выборки
[6] SNR 15дБ и при 1 мке, время осреднения максимум 3 минуты
[7] –20 дБ до –60 дБ
[8] после 10 мин. разогрева с 15 МНН.@T=constant

Agilent E6006A подмодуль измерителя мощности

Технические характеристики

	E6006A подмодуль оптического измерителя мощности
Сенсорный элемент	InGaAs
Диапазон длины волны	800- 1650нм

Калибруемые длины волн	850,1300,1310,1550 нм, 1625 нм (специальная длина волны по заказу)
Диапазон мощности	от +10 до –70 дБм
Максимум входной мощности	+13дБм/20мВт
Дисплей	
Разрешение	0.01 дБ
Единицы измерения	дБм, дБ, мВт, мкВт, нВт, пВт
Содержание	Калибруемое λ в нм, Модулируемая частота в Гц, Опорное значение в дБ
Обновлений в секунду	3
Оптический вход	Пользовательский интерфейс
Используемый тип сигнала	9/125мкм, 50/125 нм, 62.5/125мкм

Спецификации

Неопределенность при опорных условиях	±3%
Общая неопределенность λ 1300 нм, 1310 нм и 1550 нм общая неопределенность λ 850 нм	±5 % ± 0.5 нВт ±10%±2.5нВт

Общая неопределенность Уровень мощности: от +0 до -50 дБм. Непрерывная волна. Длины волн: 850 ± 3 нм, 1300 ± 3 нм, 1310±3нм, 1550нм±3нм. Тип сигнала: SM до 50 м классификационный индекс (для сигнала 62.5 м, добавить 2 % к общей неточности). Прямые и угловые коннекторы. Температура окружающей среды: от +10 до +40 °C. в течение 2 лет после калибровки.	При опорных условиях Уровень мощности: -20 дБм. Непрерывная волна. Длины волн: 1300 ± 3 нм, 1310±3нм, 1550 ± 3 нм. Тип сигнала: 50/125 мкм классификационный индекс HP/HMS-10 коннектор. Ширина полосы спектра до 10 нм. Температура окружающей среды: от +18 до +28 °C. В день калибровки добавить 0.3 % на старение за один год, добавить 0.6 % на старение за 2 года

Дополнительные характеристики:
• Автоматическое обнуление.
• Распознавание частоты модуляции (270 Гц, 1 кГц, 2 кГц) происходит при уровнях от +10 до -45 дБм (пик амплитуды).
• Распознавание закодированной длины волны (350 Гц, 550 Гц) осуществляется при уровнях мощности от+10 до -45 дБм (пик амплитуды).
• Опорная величина устанавливается заранее от +30 до -80 дБм.
• Каждая калиброванная длина волны имеет свою опорную память.
• Информация с экрана дисплея может быть переслана в опорную память (DISP→REF).
• Удержание данных

Общие характеристики

Размеры - приблизительно 120 мм x 40 мм x 25 мм.
Вес - 130 г.
Температура при эксплуатации - от 0 С до +50 С.
Температура при хранении - от -40 С до +60 С.
Влажность - 95% R.H. от 0 С до +40 С без кондиционера.
Рекомендуемый период калибровки - 2 года.

Agilent E6007A подмодуль визуального обнаружения ошибок.
Технические характеристики

	E6007A подмодуль визуального обнаружения ошибок
Тип источника	Лазерный диод
Центральная длина волны	635 ± 10 нм (видимый красный свет)
Выходной уровень мощности (CW)	максимум 0 дБм
Выходной уровень мощности (CW) в оптическое волокно 9 мкм	–3 дБм
Дальность до:	5 км
Класс лазера 11 (21 CFR 1040) класс 11 (IEC 825-1)	
Оптический выход	Пользовательский интерфейс

Дополнительные характеристики
• Непрерывная волна и мигающий режим (1 Гц для лучшей видимости)
• Для одномодовых и многомодовых кабелей

Общие характеристики

Размеры приблизительно - 120 мм х 40 мм х 25 мм.
Вес - 100 г.
Температура при эксплуатации - от 0 С до +40 С
Температура при хранении от -40 С до +60 С.
Влажность95% R.H. - от 0 С до +40 С без кондиционера.

Технические характеристики базового блока

Горизонтальные параметры
Удаленность начальной точки сканирования от 0 км до 400 км
Величина промежутка сканирования от 0.1 до 500 км
Разрешающая способность 0,1 м
Минимальный шаг выборки 0,08 м
Коэффициент преломления 1,00000-2,00000
Единицы длины км, килофуты или миля
Количество точек измерения до 16000

Вертикальные параметры

Вертикальная шкала - 0,1-10,0 дБ на деление
Разрешающая способность - 0,001 дБ
Диапазон измерения отражения - от-14 до-60 дБ
Коэффициент обратного рассеивания - 10-70db на ширине импульса 1 мкс
Автоматическая настройка и анализ - предусмотрен
Настройки прибора - их сохранение и воссоздание настроек пользователя
Часы реального времени с датой - предусмотрены

Сканирование трассы

Типы неоднородностей - отражающие и не отражающие
Максимальное число неоднородностей - 100
Порог для неотражающих неоднородностей - от 0,0 до 5,0 дБ при шаге 0,01 дБ
Порог для отражающих неоднородностей - от -14,0 до -65,0 дБ при шаге 0,1 дБ
Порог для обрывов - от 0,1 до 10 дБ при шаге 0,1 дБ

Документирование

Накопитель на гибком диске 3,5 дюйма - 1,4 МБ, совместим с форматом MS-DOS, температура при эксплуатации от 5 С до 45 С, при влажности от 35 до 80% при 40 С
Карта памяти - PCMCIA тип II 440MB, до 13000 трасс (при 16000 точек выборки)
Внутренняя память - SRAM до 2 МБ, до 100 трасс (при 4000 точек выборки)
Формат трассы - соответствует стандарту Bellcore GR-196-CORE Issue 1 OTDR Data Standard
Информация трассы – 5 сообщений до 15 знаков и 5 сообщений
до 41 знака для каждой трассы

Дисплей

VGA-LCD - 18,3 см, моно (возможен цветной дисплей)
Число точек - 640 х 480 точек

Интерфейсы

RS232C - максимальная скорость двоичной передачи 115200 битов/с
Centronics - стандартный параллельный порт (SPP)
Клавитура - PS2 (Mini-DIN)

Общие параметры

Температура хранения - от -40°C до +60°C
Температура при эксплуатации - от 0°C до +50°C
Влажность95% R.H -. от 0°C до +40°C

Источник тока

Переменный ток - 100-240 В ±10%, 50-60 Гц
Постоянный ток - 16-24 В
Батарея - NiMH обычно 8 часов непрерывной работы (минимум 4 часа)
Время зарядки - <3 часов
Индикатор заряда батареи - предусмотрен

Габариты 194 мм x 290 мм x 75 i
Вес < 2,8 кг, включая батарею

Российское представительство Agilent Technologies:
Москва, 113054, Космодамианская набережная, 52, строение 1
Тел.: (095) 797 3963
Факс: (095) 797 3902
e-mail: tmo_Russia@agilent.com
URL: www.agilent.ru

Модульный сетевой тестер Agilent 3900A

Модульный сетевой тестер предназначен для тестирования оптических сетей при их строительстве и эксплуатации. В ней содержится линейка из приборов высочайшего класса, обладающими прекрасными эксплуатационными характеристиками. Результаты измерений выводятся на большой цветной сенсорный экран с удобным для настройки интерфейсом. Модульная конструкция системы позволяет компоновать из неё именно те приборы, которые необходимы в данный момент оператору. В первую очередь это различные конфигурации оптических рефлектометров, предназначенные для тестирования распределения неоднородностей, как в городских, так и в магистральных линиях связи. Для увеличения скорости и удобства тестирования многоволоконных оптических линий к системе может быть подключен модуль с оптическим переключателем.

При тестировании оптических сетей с DWDM системой необходимо иметь возможность измерять спектральные характеристики этой системы с очень высоким спектральным разрешением. Для этой цели служит модуль оптического анализатора спектра.

В процессе строительства и эксплуатации оптических сетей часто приходится проверять качество торцов оптических разъемов. При этом необходимо не только иметь оптическую систему с большим увеличением, но и решить проблему защиты глаз оператора от попадания мощного излучения действующей линии. В измерительной системе Agilent 3900A эта проблема решается при подсоединении модуля с микроскопом и видеокамерой.

Портативную измерительную систему компании Agilent в полной мере можно рассматривать, как оптический сетевой тестер. Приборы, которые можно компоновать в этой системе обладают не только легкой и эргономичной конструкцией, высвобождающей при работе руки оператора, но имеют ещё и очень высокую степень надежности. Приборы проходят испытания на устойчивость к вибрациям, ударам и температуре. За счет использования выдвижной конструкции оптического разъема удалось значительно повысить надежность этого традиционно слабого звена в оптических приборах.

Модули оптического рефлектометра

В конфигурации оптического рефлектометра к базовому модулю подключается один из оптических модулей N3910AM, N3910AL, N3911AL, N3914AL, N3916AL Модуль N3914AL (1310/1550/1625 нм) оптимизирован для работы на трех длинах волн. Он предназначен для применения в городских сетях, где для передачи данных используется весь диапазон пропускания волокна - от 1310 нм до 1625 нм. Модули N3910AL (1310/1550 нм) и N3911AL (1550/1625 нм) оптимизированы для работы в дальних линиях связи. Их динамический диапазон расширен до 45 дБ, что позволяет существенно увеличить скорость тестирования линий связи, и дает возможность проверять двухсоткилометровые участки. Модуль N3910AM (1310/1550 нм) может применяться как в городских, так и в магистральных линиях связи.

Модуль оптического переключателя N3940AA

При тестировании многоволоконных кабелей необходимо многократно подключаться к волокнам и выполнить большое количество измерений с каждым отдельным волокном. Универсальная конструкция оптических разъемов в переключателе 1 12 компании Agilent позволяет подсоединять их практически ко всем типам разъемов в стандартных одномодовых волокнах. Подсоединив оптический переключатель 1 12 к модулям рефлектометра можно частично автоматизировать и упорядочить процедуру измерения, разбив волокна в кабеле на группы по 12 волокон. Для каждого из волокон может быть запрограммировано 8 различных видов измерений. Эти измерения могут отличаться длиной волны источника излучения, длительностью импульсов, временем

усреднения и т.д. Каждое из 12 подсоединенных волокон будет последовательно обмерено, а результаты измерений автоматически сохранены.

Анализатор хроматической дисперсии (CD) N3916AL

Быстрое и легкое определение типа оптоволокна и измерение хроматической дисперсии нажатием одной клавиши. Интеллектуальные алгоритмы проверки хроматической дисперсии и предустановленные на заводе параметры измерений дают пользователю информацию о типе оптоволокна и точном значении дисперсии нажатием одной клавиши. Необходим доступ только к одному концу линии. Используя комбинированные возможности измерения модулем OTDR на четырех длинах волн и измерения хроматической дисперсии, определение потерь в оптоволокне тестирование хроматической дисперсии можно выполнять за один рабочий цикл.

Тестовая подсистема анализатора поляризационной модовой дисперсии Agilent N3909A

Тестовая подсистема анализа поляризационной модовой дисперсии (PMD) от компании Agilent Technologies. первая в мире портативная система для анализа PMD, предназначенная для работы в полевых условиях, основана на "золотом стандарте" метода анализа собственных значений матрицы Джонса. Компания Agilent Technologies сделала этот метод быстрым и надежным для использования в полевых условиях, что позволяет значительно уменьшить влияние искажений, обусловленных перемещением и вибрацией оптоволокна, на результаты измерений.

Модуль оптического анализатора спектра N3935A

В последние годы в связи с интенсивным развитием DWDM технологий измерение спектральных характеристик оптического излучения становится одним из основных видов измерений в волоконно-оптических системах передачи. Модуль N3935A позволяет проводить измерения в S-, C- и L- диапазонах (1450-1650 нм), одновременно в 256 каналах с межканальным интервалом до 25 ГГц (0.2 нм). В нем реализовано быстрое сканирование спектра, высокое разрешение, большой динамический диапазон, уникальная линейность и широкий набор программ для обработки результатов измерений.

Микроскоп с видеокамерой Agilent N3988A

Микроскоп с видеокамерой позволяет оценивать качества торцов оптических разъемов при мощности инфракрасного излучения в линиях передачи до 30 дБм. Применение видеокамеры значительно облегчает наблюдение торцевых поверхностей при большом 400 кратным увеличении, позволяет сохранять в памяти их изображении и, что особенно важно, практически исключает возможность попадания мощного инфракрасного излучения в глаза оператора. Видеокамера не требует дополнительного питания, видеосигнал и питание подаются по единому USB кабелю подсоединяемому к базовому блоку Agilent 3900A.

Динамический диапазон рефлектометра, дБ

(стандартное одномодовое волокно, SNR=1, время усреднения 3 мин)

		N3910AM		N3910AL		N3911AL		N3916AL			
								N3914AL			
Центральная длина волны, нм		1310±25	1550±25	1310±25	1550±25	1310±25	1625±20	1310±25	1550±25	1625±20	1480±20
Ширина импульса	10 нс	19	17	24	22	22	18	22	20	16	19
	100 нс	24	22	29	27	27	24	27	25	22	24
	1 мкс	30	29	35	34	34	30	33	31	28	30
	10 мкс	38	37	42	41	41	37	40	38	35	37
	20 мкс	40	39	45	43	43	39	43	41	38	-

Параметры даны для температуры 22 ± 3°С. На всех длинах волн доступен набор импульсов: 10 не, 30 не, 100 не, 300 не, 1 мкс, 3 мкс, 10 мкс, 20 мкс (за исключением 1480 нм).

Общие характеристики оптического рефлектометра

Точность измерения расстояния = ± (погрешность смещения + ошибка масштабирования • измеряемое расстояние + ошибка выборки)	Погрешность смещения	±0.3м
	Ошибка масштабирования	± 5 10-4
	Ошибка выборки	± 0,5 шага выборки (мин. шаг 8 см)
Встроенный источник [изучения	Мощность на выходе	от - 3 до - 8 дБм- (в зависимости от типа модуля и длины волны)
	Стабильность, дБ	±0,1 дБ и ±0,15 дБ на 1625 нм (после 10 мин прогрева, 15 мин при Т=const)
	Модуляция	270 Гц, 1 кГц, 2 кГц
Точность измерения потерь и отражений	потери отражение	±0,03аВ(SNR>15а5, 1 мкс) ± 1,0 дБ (от -20 до -60 дБ, 100нс)
Зона нечувствительности по событию	3м (При отражении < - 35 дБ, ширине импульса 30 нс и длине < 4 км)	
Ближняя зона нечувствительности	10 м (1310 нм), 12 м (1550 нм), 14 м (1625нм) (При отражении < - 50 дБ, ширине импульса 30 нс, длине < 4 км)	

Дисплей	Горизонтальная	Разрешение	Считывания: 10 см Выборки: 8 см
		Количество точек	От4000до64 000
		Диапазон длин	От 0 до 400 км, участками от 0,1 до 400
		Единицы измерения	Километры, футы, мили
		Диапазон показателя	От 1,00000 до 2,00000
	Вертикальная	Масштаб по затуханию	От 0,1 до 10,0 дБ/деление
		Разрешение	0,001 дБ
		Диапазон отражений	От-14 до-70 дБ
		Диапазон коэффициента	От10!до70дБна 1 мкс
Обработка трасс	Типы событий		Отражающие и не отражающие неоднородности, обрывы
	Кол-во событий		100 максимум
	Измеряемые параметры		Коэффициент отражения, потери,
	Автоматические измерения		Предусмотрены
	Персональный компьютер		Предусмотрено программное обеспечение для обработки трасс
Формат сохранение данных			Belcore/TelcordiaGR-196, Rev. 1.0, Rev. 1.1, Rev. 2.0
Размер			217x212x33 мм
Вес			<1,2кг

Характеристики подсистемы анализатора PMD N3909A и анализатора хроматической дисперсии N3916AL

Подсистема анализатора PMD		Анализатор хроматической дисперсии (прямое измерение времени запаздывания)	
Диапазоны длин волн	от 1525 до 1620 нм	Диапазоны длин волн	1250-1700 нм
Разрешение по установке длины волны	0.3 нм	Дисперсионный диапазон	± 2500 пс/нм
Погрешность измерения значения DGDa	±(100фс+3%отГХЮ)	Динамический диапазон, (при отражении от торца (4%) и от зеркала(96%))	32/38 дБ
Диапазон измеряемых значений PMD	от One до 115пс	Разрешение по установке длины волны	±0.1 нм
Погрешность измерения значения DGDb>c	±(0,02пс + 2% от PMD)	Длина волны нулевой дисперсии (повторяемость)	± 0.6 нм
Погрешность измерения потерь в линии связи d	± 0,4 дБ	Коэффициент дисперсии (повторяемость)	0.05 пс/нм км
Время измерения	15с	Коэффициент дисперсии (точность)	± 0.5 пс/нм км
Максимальные потери в линии связи6' f- 9	53 дБ		
Другие свойства: Не подвержен влиянию из-за перемещения оптоволокна. Допускает измерения через оптические усилители			

[a] - Для DGD < 50 пс.
Значение является типовым для DGD > 50 пс
[b] - Для DGD ^ 20 пс.
Значение является типовым для DGD > 20 пс
[c] - Пролет для длины волны 100 нм
[d] - Погрешность, вносимая соединителем не учтена
[e] - Для длин волн от 1570 до 1630 нм: 50 дБ во всем диапазоне
[f] - При вариациях потерь J 10 дБ (размах) в диапазоне измеряемых длин волн
[д] - Для испытуемых оптоволокон с потерями > 0 дБ (усиление) выходная мощность блока источника должна быть уменьшена до 6 дБм. Для всех других значений потерь испытуемых волокон следует использовать установку по умолчанию: 13дБм

Характеристики анализатора спектра N3935A

Диапазоны длин волн	от 1450 до 1650 нм	Погрешность уровня мощности из-за поляризации f	±0,05 дБ
Максимальное число одновременно анализируемых каналов	256	Разрешающая способность отсчета	0,01 дБ
Максимальное число точек дискретизации	40000	Коэффициент подавления оптического сигнала	45 дБс на 100 ГГц
Ширина полосы разрешения (полная ширина на уровне 0,5)	< 100 пм		40 дБс на 50 ГГц
Абсолютная погрешность	± 0,03 нмь		< 35 дБс на 25 ГГц
Относительная погрешность0	± 0,02 нм	Уровень шумов (СКЗ)	-70 дБм
Разрешение сканирования	0,005 нм	Макс, неразрушающая входная мощность h	+30 дБм
Абсолютная погрешность d	± 0,3 дБ в	Обратные потери f	>40дБ
Относительная погрешность (отн. длины волны)с	± 0,2 дБ *	Габаритные размеры	217 мм (высота), 212 мм (ширина), 90 мм (глубина)
Нелинейность (относительно уровня мощности)с	±0,1 дБ	Масса	без упаковки 2,5 кг

[a] - Диапазон длин волн: от 1500 нм до 1620 нм.

Приведены рабочие оптические параметры после 30-минутного времени установления рабочего режима (допустимо 60 минут на акклиматизацию, если прибор хранился при другой температуре). Если не указано по-другому, технические характеристики распространяются на измерение по одному каналу.
± 0,04 нм в стандартных условиях (уровень сигнала -20 дБм; 23 ± 3°C). Погрешность измерения поверяется в Национальном институте стандартов США и в Федеральном физико-техническом институте ФРГ.
Уровень сигнала: от -30 дБм до +5 дБм.
Включая погрешность, обусловленную поляризацией.
± 0,6 дБ в стандартных условиях (уровень сигнала -20 дБм; 23 ± 3 °C). Погрешность измерения поверяется в Национальном институте стандартов США и в Федеральном физико-техническом институте ФРГ.
При длине волны 1550 нм.
j 40 дБс при 100 ГГц и i 35 дБс при 50 ГГц для уровней сигнала более 0 дБм. [h] Максимум +15 дБм на канал (0,1 нм).

Характеристики модулей оптического переключателя N3940AA и микроскопа с видеокамерой N3988A

Оптический переключатель		Микроскоп с видеокамерой	
Число портов	1x12	Формат записи	JPEG или BMP
Диапазон длин волн	1280-1650	Интерфейс	USB 1.1
Вносимые потери[1]	2.7 дБ	Функции настройки видеокамеры	Фокусировка, изменение масштаба изображения 250-400, запись изображения, включение подсветки от светодиодов
Зависимость потерь от	±0.05 дБ		
Отражение от разъемов PC/APC	40/50 дБ		
Повторяемость[2]	0.02 дБ		
Перекрестные помехи	50 дБ		
Максимальная входная мощность	200 мВт (+23 дБм)	Разрушающая мощность	> +23 дБм м
Потребляемая	1 Вт	Потребляемая	1 Вт
Скорость переключения	100 мс	Длина USB	2м
Габариты	217x212x33	Габариты	050x200 м
Вес	1.4 кг	Вес	0.2 кг

[1] Без учета потерь вносимых разъемами на входе и выходе. Входной разъем вносит 0.2 дБ (тип), выходной разъем 0.5 дБ (тип)
[2] При статическом положении переключателя и при постоянной температуре 25°C

Характеристики базового блока N3900A.

Память Внутренняя память: 170 Мбайт 3,5" дисковод: дискеты 720/1440 Кбайт. PCMCIA: один слот для Type III или два слота для Type II, диск емкостью до 512 Мбайт **Дисплей** Цветной, жидкокристаллический на тонкопленочных транзисторах с разрешением 800 600 точек (SVGA) и размером по диагонали 25,9 см (10,4 дюйма) Интерфейсы RS232C: 9 контактный порт, макс, скорость 115200 бод Параллельный порт: 25 контактный стандартный параллельный порт (Centronics) Универсальная последовательная шина (USB 1.1): для подключения видеокамеры с микроскопом N3988A USB 1.1 Peripheral: скорость передачи до 12 Мбит/с	LAN: розетка RJ-45, (Ethernet 10/100) Клавиатура: порт PS/2 (Mini-Din) VGA: аналоговый выход для SVGA монитора 60 Гц3 Головной телефон: стандартное гнездо для микрофона **Общие характеристики** Рабочая температура: от 0 до +50° C Температура хранения: -20 до +60° C (без батареи) Влажность: 95 % при температуре от 0 до +40° C Габариты: 330 230 61 мм Вес: 3.3 кг, включая блок питания батарей Питание От сети переменного тока: 100-240 В, 50-60 Гц От сети постоянного тока: 18 В, 60 Вт Батарея: ионно-литиевая, 5 часов (тип.), при непрерывной работе модуля OTDR и 50 % подсветке монитора Время заряда батареи: < 3 часов в нерабочем состоянии прибора Защита от глубокой разрядки батареи: обеспечена

Портативный рефлектометр Anritsu MW9076

Рефлектометр сделан по классической схеме и состоит из экранного модуля и собственно блока оптического рефлектометра. Один экранный модуль может использоваться с несколькими разными оптическими блоками. Конструкция корпуса очень прочная и надежная, все интерфейсные разъемы закрыты специальными резиновыми крышками.

Отличительной особенностью является наличие оптического блока D1, позволяющего измерять хроматическую дисперсию в одномодовых волокнах. Измерение производится по отражению от дальнего конца волокна, т.е. не требует размещения на дальнем конце какого либо оборудования. В стандартный комплект входят: удобный кейс для переноски, описание на русском языке, программное обеспечение для персонального компьютера, карта памяти, адаптер питания от сети, копия сертификата Гостандарта и свидетельство о первичной поверке.

Спецификация Anritsu MW9076

Модель	MW9076J	MW9076K	MW9076B1	MW9076B	MW9076C	MW9076D1
Длины волн (nm)	850	850/1300	1310/1550	1310/1550	1310/1550/ 1625	1310/1450/ 1550/1625
Тип волокна	MM, 50/125 цт или 62,5/125 мт		SM 10/125 urn (ITU-T G.652), DS, NZDS			
Разъемы	FC, SC, DIN, HMS-10/A, ST (PC, сменные адаптеры)					
Диапазон расстояний	1,2.5,5, 10,25,50, 100 km		1, 2.5, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 250, 400 km			
Длительность импульса	10 ns, 20 ns, 50 ns, 100 ns, (200 ns, 500 ns, 1 ms - 1310 nm)		10 ns, 20 ns, 50 ns, 100 ns, 200 ns, 500 ns, 1	is, 2 ms, 10 ms, 20 ms		
Динамический диапазон (dB)(S/N=1)	21	21/25	40,5/38,5	45/43	41,5/39,5/ 37	34,5/33,5/ 32,5/30
Мертвая зона (рассеяние)	<7m	<7m	<8/9m	<8/9m	< 8/9/12 m	<25m
Мертвая зона (отражение)	<2m		< 1,6 m			<3m
Разрешение	0.05 - 200 m		0.05 - 800 m			

индикации		
Разрешение записи	0.05 - 20 m	0.05 - 80 m
i Кол-во точек	Норма: 5001; высокая плотность: до 50001	
Шкала Y	0.25,0.5, 1.25,2.5,5, 10, 15 dB/div	
Установка n	1.400000 до 1.699999 (шаг 0.000001)	
Точность измерения расстояний	A = ±1 m	A = ±0,1m
	A ±3 x измеренное_расстояние x 10^{-5} ±разрешение_индикации (не учитывая неопределенность установки n)	
Точность измерения потерь (линейность)	±0.05 dB/dB или ±0.1 dB (наибольшее из значений)	
Точность измерения отражения	±4dB	±2dB

Определение неоднородностей: отображаются последовательно все найденные неоднородности и их параметры: расстояние, суммарные потери или потери на неоднороднхти, тип неоднородности.
Измеряемые параметры: суммарные потери, суммарное отражение или относительные потери для каждого участка, потери на стыке, уровни отражений. Результаты представляются в виде таблицы.

Пороговые значения для определения неоднородностей: потери от 0.01 до 10 dB (шаг 0.01 dB), отражение: от - 20.0 до -60.0 dB (шаг 0.1 dB), конец волокна: от -1 to -99 dB (шаг 1 dB).
Число детектируемых событий: до 99.
(Автоматические установки: диапазон расстояний, длительность импульса, число или время усреднения.
Автоматически проверяется качество подключения к разъему прибора.
Автоматически проверяется наличие постороннего излучения в измеряемом волокне.

1 *1

Измеряемые величины: потери, расстояние, относительные потери, потери на соединении, отражение и разница уровней
Время сканирования: 0.1 - 0.2 сек

Хранение результатов: SR-4731, GR-196-CORE, Anritsu формат.
Внугрення память - 19 Мб, дискеты 1.5 Мб, карты памяти до 512 Мб.
Язык интерфейса: Английский или Русский
Функция энергосбережения: Автовыключение подстветки: нет или от 1 до 99 мин., автовыключение питания: нет или от 1 до 99 мин.
Комментарий: до 32 символов
Индикация заряда батареи, контроль качества подключения, контроль наличия излучения в волокне ЖКИ, цветной, 21 см (8.4 дюйма), 640 x 480 точек, с подсветкой. Модель MU250000A

Интерфейсы	Дисковод 3,5" Клавиатура (DIN 6) Принтер (Centronics) VGA монитор (DIN 10) RS-232 для подключения к компьютеру RS-232 для подключения оптического переключателя 2 слота PCMCIA (подходят карты Compact Flash II до 512 Мб)
Класс лазерной безопасности	21CFR Class 1, IEC 60825-1 Class 1
Питание	Внешний источник = 10 - 26.4 В Сеть 100 до 240 В, 50/60 Гц (через адаптер) Тип батареи: CGR-B/802D (Литий-ионная)
Потребляемая мощность	4 Вт, при заряде батареи <35 Вт

Время работы от батареи	>6ч
Размеры и вес (с батареей и экранным модулем)	290 x 194 x 77 mm, 3.7 кг (MW9076J/K/B1/B/C) 290 x194 x122 mm, 5.4 кг (MW9076D1)
Условия окружающей среды	Условия эксплуатации: -10 до +40°C, влажность <85% (без конденсации) Условия хранения: -20 до +60°C, влажность <85% Вибрации: соответствует MIL-T-28800E Class 3, удары: соответствует MIL-T-28800E Move shock: MIL-T-28800E Style C (20.3 cm corner, surface total 14 times shocks, Power OFF), Vamp: IEC 63-2-29, JIS C 0042

Измерение хроматической дисперсии (только для MW9076D1)

Диапазон измерений	1300-1660 nm
Точность по длине волны	± 0.5 nm
Воспроизводимость определения точки нулевой дисперсии	± 0.6 nm
Воспроизводимость определения дисперсии	± 0.05 ps(nm • km)
Динамический диапазон	30 dB (при 4% отражении от конца волокна)

Источник излучения (только для MW9076B и MW9076C)

Тип волокна:	SM fiber (ITU-T G.652), PC type
Оптический разъем:	тот же что и для OTDR
Тип лазера	FP-LD
Длина волны излучения	1310/ 1550/(1625 - MW9076C) ±25 nm
Ширина спектра	5-10 nm
Выходная мощность	-3±1.5dBm
Стабильность	0.1 dB
Форма сигнала	CW или 270 Hz/1 KHz/2 KHz (меандр)
Класс безопасности:	21CFR Class 1, EC 60825-1 Class 1

Опции для Anritsu MW9076

Источник видимого излучения MW9076B/B1/C/D1/J/K-01

Длина волны	635nm±15nm(at25°C)
Выходная мощность	-3±1.5dBm
Тип волокна	10/125 pm, SM (ITU-T G.652)
Оптический разъем	FC, SC, ST, DIN.HMS-10/A
Класс безопасности	IEC60825-1 Class 1M, 21CFR Class 2
Условия эксплуатации	Температура: 0 до +35°C,
	Влажность: <85% (без конденсации)

Измеритель оптической мощности MW9076B/B1/C -02 – 03

Тип волокна	10/125 pm.SM (ITU-T G.652)
Оптический разъем	FC, SC, ST, DIN, HMS-10/A
Диапазон длин волн	1200-1700 nm
Диапазон измерений	+3...-70dBm или+23 ...-50 dBm
Точность	±5%
Отражение	< - 36 dB

Портативный рефлектометр Anritsu MT9080 ACCESS Master ™

Основное назначение этого прибора - городские и локальные сети. Высокая разрешающая способность позволяет видеть неоднородности оптической линии расположенные менее чем в 1 метре друг от друга. Полная комплектация включает в себя кроме собственно оптического рефлектометра, источник излучения на рабочей длине волны, источник видимого излучения, измеритель оптической мощности, анализатор сетей Ethernet 10/100 Мбит/с и Gigabit Ethernet (1 Гбит/с).

Прибор сделан в виде единого блока. Конструкция корпуса очень прочная и надежная, все интерфейсные разъемы закрыты специальными крышками. Имеется специальная защита при эксплуатации в тяжелых условиях, где велик риск механического повреждения.

Спецификация Anritsu MT9080

Модель	MT9080A	MT9080B	MT9080C	MT9080D	MT9080E	MT9080F I
Длины волн (nm)	1310	1550	1650	1310/1550	1550/1650	1310/1550/ 1650
Тип волокна	SM 10/125 цт (ITU-T G.652)					
Разъемы	FC, SC, DIN, HMS-10/A, ST, LC (PC, сменные адаптеры) или FC, SC (APC, определяется при заказе)					
Диапазон расстояний	0.5,1,2.5,5,10,25,50 km					
Длительность импульса	3 ns, 20 ns, 50 ns, 100 ns, 200 ns, 500 ns, 1 ps, 2	is				
Динамический диапазон (dB)(S/N=1, 2 ms, 180 с)	26,5	25	22	26/24,5	24,5/22	25,5/24/22
Мертвая зона (рассеяние)	<7.5m	< 8.5 m	< 11 m	<7.5m/ <8.5m	< 8.5 m / < 11 m	<7.5m/ < 8.5 m / < 11m
Мертвая зона (отражение)	< 1 m (< 0.8 m (типично))					
Разрешение индикации	0.05 to 100 m					
Разрешение записи	0.05 to 10 m					
Кол-во точек	Норма: 5001; высокая плотность: 20001 или 25001					
Шкала Y	0.05, 0.125, 0.25, 0.5, 1.25, 2.5, 5, 6.5 dB/div					
Установка п	1.000000 до 1.999999 (шаг 0.000001)					
Точность измерения расстояний	±1 m ±3 х измеренное_расстояние х 10~5 ±разрешение_индикации (не учитывая неопределенность установки п)					
Точность измерения потерь (линейность)	±0.05 dB/dB или ±0.1 dB (наибольшее из значений)					
Точность измерения отражения	±2dB					

£ 1 & I I 1 § i i 1	Определение неоднородностей: отображаются последовательно все найденные неоднородности и их параметры: расстояние, суммарные потери или потери на неоднородности, тип неоднородности. Измеряемые параметры: суммарные потери, суммарное отражение или относительные участка, потери на стыке, уровни отражений. Результаты представляются в виде Пороговые значения для определения неоднородностей: потери от 0.01 до 9.99 dB (шаг 20.0 до -60.0 dB (шаг 0.1 dB), конец волокна: от -1 to -99 dB (шаг 1 dB). Число Автоматические установки: диапазон расстояний, длительность импульса, число или Автоматически проверяется качество подключения к разъему прибора. Автоматически проверяется наличие постороннего излучения в измеряемом волокне (>-AQ dBm).
Ручное измерение	Измеряемые величины: потери, расстояние, относительные потери, потери на соединении, отражение и разница уровней Время сканирования: менее 0.2 сек
	Тип волокна: SM fiber (ITU-T G.652), PC type Оптический разъем: тот же что и для OTDR Тип лазера: FP-LD

If	Длина волны излучения: 1550 ±30 nm (MT9080B/D/^F) 1650 ±5 nm (MT9080C/FVF)	1310 ±30 nm (MT908QA/D/F)
X	Выходная мощность:	> -8 dBm
i	Форма сигнала:	270 Hz/1 KHz/2 KHz (меандр)
s	Частота модуляции:	270 Hz/1 KHz/2 KHz ±1.5%
	Время прогрева:	10 мин
	Класс безопасности:	21CFR Class 1, EC 60825-1 Class 1
1	Тип волокна:	SM fiber (ITU-T G.652)
B	Установка длин волн:	MT9080A/B/D (1310/1550 nm port):
I x	MT9080C/F7F (1310/1550 nm port): 1310/1550/1625 nm	
i 1	MT9080C/F7F (1650 nm port): 1650 nm	
-c	Оптический разъем:	те же что и для OTDR
i s	Диапазон измерений:	-50 to -5 dBm
1	Максимальная входная мощность:	+10 dBm
	Точность измерений:	±6.5% (-20 dBm, 1550 nm, CW, 23°C ±2°C)
	Хранение результатов:	SR-4731, курсоры, внутренняя память
	Язык интерфейса:	выбирается
X	Функция энергосбережения:	
1	Автовыключение подсветки:	нет или от 1 до 99 мин.,
i-	автовыключение питания:	нет или от 1 до 99 мин.
B	Программное обеспечение для обработки рефлектограмм на персональном компьютере:	
1	Функция сравнения рефлекторам, календарь, часы.	
(g	Единицы расстояний:	km, kf, mi, f, m
	Комментарий:	до 32 символов
	Индикация заряда батареи, контроль качества подключения, контроль наличия излучения в волокне	
Дисплей	ЖКИ, 16 см (6.2 дюйма), монохромный, 640 x 480 точек, с подсветкой.	
1	USB1.1	
-g	Type A x 1 (memory), Type B к 1 (USB mass storage class):	
s	Внутренняя память MT9080 может быть доступна для чтения-записи с персонального компьютера через USB порт.	

ANRITSU

Класс лазерной безопасности	21CFR Class 1, IEC 60825-1 Class 1
Питание	Внешний источник = 10.8 -15 В Сеть 100 до 240 В, 50/60 Гц (через адаптер) Тип батареи: DR15SBA
Потребляемая мощность	5 Вт, при заряде батареи <20 Вт
Время работы от батареи	>4ч
Время заряда батареи	< 3ч
Размеры и вес	254 (W) x 162 (H) x 61 (D) mm (базовый блок) 277 (W) x 199 (H) x 80 (D) mm (базовый блок + защита + крышка) < 2 кг (базовый блок), < 2.2 кг (с батареей DR15SBA) < 2.9 кг (базовый блок + батарея + защита)
Условия окружающей среды	Условия эксплуатации: 0 до +40°C, влажность <85% (без конденсации) Условия хранения: -20 до +60°C, влажность <85% Вибрации: соответствует MIL-T-28800E Class 3, удары: соответствует MIL-T-28800E Move shock: MIL-T-28800E Style C (20.3 cm corner, surface total 14 times shocks, Power OFF), Vamp: IEC 63-2-29, JIS C 0042

Электромагнитная совместимость	EN61326:1997/A2: 2001 (Class A), EN61000-3-2: 2000 (Class A), EN61326: 1997/A2: 2001 (Annex A)
LVD	EN61010-1: 2001 (Pollution Degree 2)

Опции для Anritsu MT9080 Источник видимого излучения MT9080[ ]-02

Длина волны	635nm±15nm(at25°C)
Выходная мощность	-3 ±1.5dBm
Тип волокна	10/125 pm.SM (ITU-T G.652)
Оптический разъем	FC, SC, ST, DIN, HMS-10/A, LC
Класс безопасности	IEC60825-1 Class 1M, 21CFR Class 2
Условия эксплуатации	Температура: 0 до +35°C,
	Влажность: <85% (без конденсации)

Анализатор Ethernet / IP сетей 10/100 Мбит/с MT9080[ ]-001

Тип подключения	10BASE-T/100BASE-TK: 1 port

Анализатор Ethernet / IP сетей 10/100/1000 Мбит/с MT9080[ ]-011

Тип подключения	10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-T: 1port

Оптические рефлектометры EXFO

Большое разнообразие волоконно-оптических сетей на современном телекоммуникационном рынке предъявляет серьезные требования к измерительному оборудованию. Сети сверхдальней связи с оптическими усилителями, высокоскоростные сети со спектральным DWDM-уплотнением, сети с большим числом волокон в кабеле, CWDM-сети и сети городского масштаба со скоростями 2,5/10 Гбит/с, наконец, пассивные оптические сети (PON) и другие типы сетей доступа - все они нуждаются в особых, точных и современных процедурах тестирования.

Обычно задачи полноценного тестирования сети решаются несколькими специализированными измерительными модулями, которые объединяются на базе единой платформы. Для измерений в полевых условиях EXFO предлагает две портативные, противоударные измерительные платформы. Это компактный минирефлектометр FTB-100B и мощная универсальная измерительная система FTB-400.

Универсальная измерительная система FTB-400

Универсальная измерительная система FTB-400 - это модульная платформа для тестирования и мониторинга ВОЛС в полевых условиях. Система FB-400 выпускается в двух вариантах:

• 7-слотовая модель FTB-400 имеет семь объединенных друг с другом слотов, куда могут устанавливаться все виды измерительных модулей: однослотовые OTDR, двухслотовые оптические переключатели, трехслотовые многоволновые измерители, анализаторы спектра, хроматической дисперсии и PMD. Выбор из более чем 60 измерительных модулей EXFO обеспечивает свыше 1000 конфигураций для всестороннего исследования волоконно-оптических сетей связи, включая тестирование систем DWDM.
• 2-слотовая модель FTB-400 имеет два отдельных вертикально расположенных слота, в которые могут устанавливаться однослотовые измерительные модули: оптические рефлектометры и измерители потерь.

Легкий и прочный корпус из магниевого сплава надежно защищает измерительную аппаратуру от попадания влаги и пыли. Резиновые амортизаторы эффективно гасят сотрясения и удары, неизбежные при работе в полевых условиях. Модули легко заменяются

вручную за несколько секунд без каких-либо специальных инструментов. Сенсорный цветной жидкокристаллический дисплей имеет разрешение 800x600 пикселей при диагонали 12,1" и дает отличное изображение даже при прямом солнечном освещении. На FTB-400 установлен профессиональный пакет программ ToolBox 6.0, разработанный специально для обработки результатов оптических измерений. При тестировании многоволоконных систем применяются современные скоростные методы пакетной обработки данных.

Система FTB-400 оснащена процессором Pentium II, оперативной памятью 512 МБ, жестким диском до 60 ГБ и работает под операционной системой Windows 2000. Возможна установка внешнего принтера, клавиатуры, дисплея и мыши. Пишущий CD-ROM, адаптер Ethernet, факс-модем, аудио/видео вход/выход, микрофон, последовательный DB-9 и параллельный DB-25 порты превращают FTB-400 в мощную мультимедийную платформу.

Оптический минирефлектометр FTB-100

Минирефлектометр FTB-100 рассчитан на работу в полевых условиях. Корпус FTB-100 надежно амортизирует удары и сотрясения, высокая брызгозащищенность позволяет проводить измерения при любой погоде. Модульная архитектура позволяет при необходимости быстро менять конфигурацию прибора. Все модули FTB-100 совместимы с универсальной измерительной системой FTB-400. Сенсорный экран обеспечивает быстрый доступ ко всем функциям меню. Экран FTB-100 выдерживает более миллиона прикосновений в одну точку и многократно превосходит обычную клавиатуру по сроку службы. Минирефлектометр FTB-100 работает под операционной системой Windows CE и полностью совместим с персональным компьютером. Отсутствие жесткого диска и других движущихся частей обеспечивает значительную надежность и механическую прочность прибора.

Измерительные рефлектометрические модули FTB-7000

Роль рефлектометров (OTDR) при строительстве, эксплуатации и ремонте оптических сетей становится высокой как никогда. Рефлектометры компании EXFO (Канада) позволяют обнаружить и точно измерить сварные стыки, разъемные соединения, разветвители, обрывы волокна, отражения сигнала и другие событий в канале связи. Большой выбор среди сменных измерительных модулей серии FTB-7000B предоставляет возможность тестирования оптической сети любого типа. Каждый модуль из серии FTB-7000D и FTB-70000C способен выполнять тестирование на 4 или 3 важнейших длинах волн (1310, 1550, 1625 и 1490 нм). Кроме того, модуль FB-7000D, предназначенный для тестирования сетей доступа (PON), характеризуется рекордно короткой мертвой зоной по событиям -1 м, сокращенным в 4 раза временем измерения при той же точности, возможностью тестирования каналов с разветвителями 1x32. Имеются конфигурации для тестирования как одномодовых, так и многомодовых волокон. Каждый оптический модуль снабжен стабилизированным источником света.

FTB-7000D: измерения в городских сетях, сетях доступа, FTTH

Самые короткие мертвые зоны. Исключительно короткая мертвая зона событий у нового модуля FB-7000D позволяет легко обнаружить и измерить все события в наиболее проблемной зоне между передатчиком и распределительной панелью. Эта возможность удобна и полезна для измерений в городских сетях, сетях доступа, FTTH, где события обычно расположены очень плотно. Высокая скорость измерений. В новом модуле FTB-7000D процедура сбора данных оптимизирована по времени в 4 раза! При стандартном по отрасли времени усреднения 3 минуты, та же точность с FTB-7000D достигается за 45 секунд. Полное время тестирования 96-волоконного кабеля на трех длинах волн уменьшается с 14 до 3,5 часов.

Оптимальное тестирование сетей PON. Модуль FTB-7000D разработан с учетом требований, предъявляемых сетями FTTH и, в частности, сетями PON. Так тестирование выполняется на длинах 1310, 1490 и 1550 нм. Кроме этого, программное обеспечение (ПО) рефлектометра позволяет тестировать каналы с многопортовыми разветвителями - даже с разветвителями 1x32, потери на которых превышают 16 дБ. Высокая точность локализации событий. Благодаря эффективным техническим ноу-хау модуль FTB-7000D определяет местоположение событий в волокне с очень высокой точностью:

• до 128,000 точек отсчета в рефлектограмме;
• минимальное разрешение достигает 4 см;
• нелинейность снижена до 0.03 дБ/дБ, что позволяет точнее измерять изменения мощности на событиях.

ПО обработки результатов ToolBox

Каждый OTDR-модуль EXFO поставляется с эксклюзивным программным обеспечением ToolBox. С этой мощной программой обработки результатов вы можете быстро анализировать измерения на выезде и создавать подробные отчеты, вернувшись в офис.

Двунаправленный анализ. Вы можете провести измерения с обоих концов волокна для получения средних потерь на каждом событии. Эта функция позволит правильно вычислить бюджет канала по потерям. Кроме того, это единственный способ измерения сверхдлинных (150-250 км) участков волокна.

Управление результатами. Функция автоименования файлов результатов с добавлением номера волокна экономит время оператора в полевых условиях.

Сравнение нескольких рефлектограмм. Новая возможность ToolBox позволяет сравнивать несколько рефлектограмм и обнаружить различия для волокон одной трубки, ленты или кабеля. Смена подсветки экрана. Работы по установке и обслуживанию сети могут проводиться как впомещении, так и на открытом воздухе. Новая возможность переключения фонового освещения экрана позволяет без напряжения видеть результаты как в темном помещении, так и при ярком солнечном свете.

Автоматический режим. Тестирование с помощью одной кнопки идеально подходит для основных и повторяющихся измерений. Автоматический режим - это кратчайший путь для обучения новичков. Квалифицированный специалист в офисе может предустановить параметры тестирования, выбрать одну или две длины волны для тестирования. Оператору остается лишь нажимать кнопку, инициализируя и процедуру тестирования волокна.

Режим Эксперт: гибкость для профессионалов. Для полного контроля над процедурой измерения выберите режим Эксперт. Вручную можно установить все параметры измерения, в том числе показатель преломления и коэффициент повива. Точная подстройка параметров накопления непосредственно в процессе измерения позволяет сэкономить время и получить лучшие результаты.

Быстрое создание кабельных отчетов.

Последующую обработку полученных измерений OTDR можно существенно ускорить с помощью ПО ToolBox. Вы можете легко создать полный кабельный отчет, заменив сотни распечаток волокон единым отчетом. Такой отчет сделает анализ и управление данными легким и быстрым. В автоматическом режиме собирается статистика по каждому событию и волокну. Далее определяются средние и предельные значения для всех волокон кабеля или сеанса измерений. С помощью одной мощной утилиты вы можете напечатать отчеты с результатами от точки до точки или с двунаправленными данными, основанные на одной или нескольких длинах волн, а также включить результаты потерь на отражениях, макроизгибах и возвратные потери.

По всем вопросам, связанным с измерительным оборудованием, обращайтесь к Александру Гореву, компания Телеком Транспорт: s@tt.ru, тел. 8(910) 451 2173

EXPO

Технические характеристики модулей OTDR компании EXFO

Модель	Динамич. диапазон, длина волны, нм (Хю/гОмкс)		Мертвая зона событий, м	Мертвая зона затухания, м
Модули для работы с многомодовым волокном				
ПВ-72ХХВ-С	850/1300 ±20	23/27	1,5/1,5	5/5
FTB-72XXB-D	850/1300 ± 20	25/29	1,5/1,5	5/5
Модули для работы с одномодовым волокном				
FTB-7200D-XXX	1310/1550 + 20	35/34	1/1	5/6
FTB-7200D-12CD-23B	850/1300 ±20 1310/1550 ±20	26/25 35/34	1/1 1/1	3/4.5 4/4
FTB-7300D-XXX	1310/1550 + 20 1490/1625 ±10	38/37 34/35	V1 1/1	5/6 6/6
FTB-74XXB-*B	1310/1550 ±20 1490/1625 ± 10	40/40 37/38	3/3 3/3	10/15 10/16
FTB-74234C	1310/1550 ±20 1625 ±10	41/40 38	3/3 3	8/10 10
FTB-75XX-B	1310/1550 ±20 1625 ± 10	45/45 43	3/3 3	10/15 16
FTB-7503B-B-ER	1550 ±20	44	3	15

Основные характеристики модулей OTDR

	Серии 7200B-C/7200B-D	Серии 7200D/7300D	Серии 7400B-B/7500B-B/ 74234C-B
Дистанция, км	0,625; 125; 2 5; 5; 10; 20; 40	125; 2 5; 5; 10; 20; 40; 80; 160; 260	125; 2 5; 5; 10; 20; 40; 80; 160; 260
Ширина импульса, не	10, 30, 100, 275,1000	5, 10, 30, 100, 275,1000, 2500, 10000, 20000	10, 30, 100, 275, 1000, 2500, 10000, 20000
Линейность, дБ/дБ	±0,05	±0,03	±0,05
Порог потерь, дБ	0,01	0,01	0,01
Порог разрешения, дБ	0,001	0,001	0,001
Разрешение, м	от 0,08 до 5	от 0,04 до 5	от 0,08 до 5
Количество точек	до 16 000	до 128 000	до 52 000
Неопределенность события, м	± (1 + 0,0025% х расстояние)	± (0,75 + 0,0025% х расстояние)	±(1+0,0025% х расстояние)
Время измерения	до 60 мин	до 60 мин	до 60 мин
Обновление результатов, с	<1	<0,4	< 1
Вых. мощность источника, дБм	-7	-а/45	-5
Визуальный детектор, мощность	Лазер 650±10нм 800 мкВт	Лазер 650±10нм 5 мВт	Лазер 650±10нм 800 мкВт

ОПТИЧЕСКИЙ РЕФЛЕКТОМЕТР FOD 7000 (иностранный аналог М100)

СЕРИЯ МИКРО РЕФЛЕКТОМЕТРОВ (OTDR) ФИРМЫ FOD открывает недостижимые до недавнего времени возможности для профессионалов КТВ, Телекома и локальных сетей: иметь рефлектометр всегда с собой. В кармане...

Рефлектометры серии FOD 7000 являются полно-функциональными оптическими рефлектометрами, позволяющими измерять параметры одномодовых и многомодовых линий связи. В состав рефлектометра входит встроенный определитель обрывов волокна на длину волны 650 нм.

Приборы имеют яркий цветной дисплей, встроенную память на более чем 200 рефлектограмм, возможность передачи результатов измерений на внешний компьютер для распечатывания или архивации. Рефлектометр работает на двух или четырех длинах волн. Это позволяет без дополнительных переключений провести полный анализ трассы,

обнаружить места неправильной укладки волокна, чрезмерные изгибы и напряженные участки кабеля.

Прибор поставляется с блоком подзарядки встроенных аккумуляторов, дискетой программного обеспечения и инструкцией по эксплуатации. В комплект рефлектометра также входит устройство для считывания данных с FLASH карты в компьютер, результаты измерений сохраняются в формате *.sor.

Сменные адаптеры решают обычную для рефлектометров проблему, связанную с их чистотой и отражательной способностью. На выходе определителя обрывов волокна используется универсальный адаптер для 2,5 мм коннектора. Рефлектометр поставляется с резиновым ударозащитным кожухом.

Комплект поставки:
Рефлектометр оптический
Блок питания (зарядное устройство)
FLASH карта
Устройство для считывания данных с FLASH карты в компьютер
Руководство по эксплуатации
Защитный резиновый чехол
Сумка для переноски
Комплект оптических адаптеров

Характеристики	FOD7003	FOD7004	FOD7005
Центральная длина волны излучения, нм	(650*10), (1310/1550+30)	(650± 10), (850/1300±30)	(650±10), (1310/1550±30), (850/1300±30)
Тип волокна	одномодовое 9/125 мкм	многомодовое 50/125 мкм	одномодовое 9/125мкм и многомодовое 50/125мкм
Диапазоны измерений расстояния, км	0.3,0.6,1.2,2.5,5,10, 20, 40, 80, 160	20, 40, 80, 160	20,40,80,160
Динамический диапазон, дБ	26/26	21/23	26 для одномодового оптического волокна, 21 для много-модового оптического волокна
Разрешающая способность, м	1	1	1
Мертвая зона по событиям, м	10	10	10
Мертвая зона по затуханию, м	25	25	25
Количество рефлектограмм в памяти	>200, в зависимости от применяемой Rash карты	>200, в зависимости от применяемой Rash карты	>200, в зависимости от применяемой Rash карты
Установка показателя преломления	1.400-1.600	1.400-1.600	1.400-1.600
Возможные типы адаптеров	FC, SC, ST, универсальный 2.5 мм		
Питание	NiCd батареи, 5 час непрерывной работы		
Размеры, мм / вес, г	92x170x52/900		
Рабочая температура	От-10°Сдо+50°С		
Температура хранения	От-20°Сдо+60°С		
Интерфейс	RS232		
Хранение результатов	Rash карта на минимум 200 трасс		

ОПТИЧЕСКИЙ РЕФЛЕКТОМЕТР FOD 7202 (иностранный аналог OFL200)

FOD 7202 представляет собой оптический рефлектометр нового стандарта: по весу, размерам, простоте использования. Меньший, чем большинство устройств для измерения оптических потерь, FOD 7202 имеет область использования, параметры и цену, делающие рефлектометр идеальным прибором для инсталляции и обслуживания оптического волокна в широкополосных, городских сетях и Волокно в Дом (FTTP). В отличие от определителей места обрыва, FOD 7202 измеряет обратное рассеяние и френелевское отражение волокна. Поэтому с помощью прибора можно локализовать отражающие и неотражающие неоднородности волокна, включая те, которые вызваны поломкой кабеля. Кроме того, FOD 7202 имеет встроенный определитель обрывов волокна на длину волны 650 нм для нахождения дефектов коротких трасс и прозвонки волокна.

В рефлектометре имеется автоматический режим измерения длины волокна и установки диапазона, ширины импульса, а также времени усреднения (Full Auto). Режим является идеальным для операторов, не знакомых с работой оптических рефлектометров.

Полуавтоматический режим (Semi Auto) позволяет пользователю устанавливать диапазон длин волокна, остальные параметры устанавливаются автоматически.

Ручной режим (Manual) может использоваться опытными пользователями.

Режим Live обеспечивает первоначальную проверку коннектора и отыскание повреждений волокна в режиме непрерывного сканирования трассы.

В FOD 7202 используются сменные адаптеры, что позволяет подключать кабели с различными типами коннекторов. В памяти рефлектометра может храниться до 48 трасс. В комплект поставки входит специальный кабель для переноса данных на компьютер.

Комплект поставки:

Рефлектометр оптический
Блок питания (зарядное устройство)
Кабель для переноски данных в компьютер
Руководство по эксплуатации
Защитный резиновый чехол
Сумка для переноски
Комплект оптических адаптеров

OTDR

Центральная длина волны излучения - (1550+30) нм
Тип волокна - одномодовое оптическое волокно 9/125 мкм
Число точек в файле - около 4000 при трассе длиной более 40
Диапазоны измерений расстояния - 0,3; 0,6; 1,2; 2,5; 5; 10; 20; 40; 70 км
Количество рефлектограмм в памяти - 48
Максимальное расстояние - 70 км
Минимальное расстояние - 400 м
Динамический диапазон - не менее 24 дБ П~м
Разрешающая способность - 15 м типичное значение
Мертвая зона по событиям - 20 м макс
Мертвая зона по затуханию - 15 м макс - Юм типичное
Длительность зондирующих импульсов - 30, 100, 300, 1000, 3000,10000 нс
Визуализатор повреждений на длине волны 650 нм:
Длина волны - (650±10)нм
Тип излучателя - лазерный диод
Выходная мощность излучения - не менее 0,5 мВт в одномодовом оптическом волокне 9/125 мкм

Общие характеристики:

Возможные типы адаптеров - FC, SC, ST, LC, универсальный 2,5 мм
Размеры / вес - 190x112x47 мм /600 г
Время непрерывной работы от NiCd батареи - 8 час
Разрешение экрана - 160x240, черно/белый
Рабочая температура - от-10°Сдо+40°С
Температура хранения - от -20°С до +60°С
Питание - Alkaline AA 4 шт., NiMH батарея, блок питания 100-240 В, 50/60 Гц
Интерфейс - RS232
Память - Rash карта на 48 трасс

ОПТИЧЕСКИЙ РЕФЛЕКТОМЕТР FOD 7301 (иностранный аналог OFL300)

OTDR	
Тип излучателя	Лазер FP на длину волны 1310нм, лазер FP на длину волны 1550нм, DFB лазер на длину волны 1490нм
Тип волокна	одномодовое оптическое волокно 9/125 мкм
Число точек в файле	16000 при трассе длиной более 4 км
Диапазоны измерений расстояния	0,3; 0,6; 1,2; 2,5; 5; 10; 20; 40; 70, 140 км
(Количество рефлектограмм в памяти	700 минимум, в зависимости от применяемой SD карты
(Динамический диапазон (SNR=1)	Не менее 26 дБ для 10 мкс, измерения в течение 3 мин
Разрешающая способность	0.25 м при трассе длиной <4 км; диапазон/1600 при трассе длиной >4 км
Мертвая зона по событиям	1.5 м макс.
Мертвая зона по затуханию	5мтипичное, Юм макс.
Длительность зондирующих импульсов	10, 30, 100, 300, 1000, 3000, 10000 не
Источник оптического излучения:	
Выходная мощность непрерывного излучения	1 мВт на любой длине волны
Внутренняя модуляция	1кГц/2кГц
Стабильность	0.04дБ/1час
Длина волны	(1310±20);(1490±5);(1310±20)нм
Ширина спектра	2нм тип. для 1310 нм; 0.1 нм тип. для 1490 нм; 2нм тип. для 1550 нм
Измеритель оптической мощности:	
Длина волны калибровки	850; 1310; 1490; 1550; 1625нм
Измеряемая мощность	От10до-73дБм
Разрешение	0.01 дБ
Тип фотодиода	1 мм InGaAs
Нелинейность	±0.25 дБ
Время усреднения	От20мсдо 1с
Размерность	дБм, дБ, мВт, мкВт; нВт
Визуализатор повреждений на длине волны 650 нм:	
Длина волны	650 ± 10 нм
Тип излучателя	Лазерный диод
Выходная мощность излучения	Не менее 0,8 мВт в одномодовом оптическом волокне 9/125 мкм
Общие характеристики:	
Возможные типы адаптеров	FC, SC, ST, LC, универсальный 2,5 мм
Размеры / вес	190x112x47 мм/600 г
Время непрерывной работы от NiCd батареи	8 час
Тип индикатора	3.5" цветной с подсветкой, видимый на солнце
Рабочая температура	От-10°Сдо+40°С
Температура хранения	От -20°С до +60°С
Питание	Alkaline AA 4 шт., NiMH батарея, блок питания 100-240 В 50/60 Гц
Интерфейс	USB
Память	SD карта

Комплект поставки:

Рефлектометр оптический Блок питания (зарядное устройство) Руководство по эксплуатации Защитный резиновый чехол Сумка для переноски Комплект оптических адаптеров
КБ волоконно-оптических приборов
Тел.. (7 095)290 90 88 Факс (7 095) 290 90 85 e-mail:infd@fod.ru http://Www.fod.ru
ЗАО "ЛИФОДАС"
Тел.(370 5) 2333568 Факс (370 5) 2163528 e-mail : sales@fods.com http://www.fods.com

NETTEST
Серия CMA 4500
Оптический рефлектометр(OTOP)
CMA 4500 продолжает традиции компании NetTest, оставаясь первым в отрасли оптическим рефлектометром, сконструированным с расчетом на высокую производительность и наращиваемость, необходимые для выполнения жестких требований специалистов электросвязи, одновременно ускоряя развертывание новых услуг и снижая общую стоимость измерения.

Технические параметры и характеристики[1]		
	Стандартная модель	Модель с рабочим столом на основе ПО Windows
Операционная система[2]	Windows® XPe	Windows® XP Pro
Ввод/вывод данных (модульный вариант)	CD-R/W (опционально) дисковод для флоппи-дисков 3.5" 1.44 Мбайт (опционально)	CD-R/W (стандартная комплектация) дисковод для флоппи-дисков 3.5" 1.44 Мбайт (опционально)
Ввод/вывод данных (фиксированный вариант)	Жесткий диск минимум 20 Гбайт (стандартная комплектация)	
Процессор	300 МГц со сверхнизкой потребляемой мощностью	
Системная память	256 Мбайт	
Дисплей	Сенсорный экран, 26.4 см (10.4") XGA жидкокристаллический дисплей (разрешение 1024x768 пикселей)	
Управляющий интерфейс	Сенсорный экран, средства управления курсором, выделенные аппаратные клавиши и светодиоды для отображения состояния	
Стандартные порты ввода/ вывода	USB (2), Ethernet 10/100 (1), IrDA (1), порт PS/2 для подключения мыши (1) и клавиатуры PS/2 (1)	
Габариты (высота x ширина x глубина)	24.1x34.3x9.5	
Масса	5.4 кг	

[1] Все технические параметры и характеристики являются объектом изменения
[2] Хотя Windows® является операционной системой платформы, она не доступна, если не заказана настольная модель

Требования к электропитанию

Питание от сети переменного тока (AC)	Автоматическое переключение диапазонов: 92-132 В, 47-63 Гц и 184-264 В, 47-63 Гц
Питание от батарей	1 стандартная Li-Ion аккумуляторная батарея
Время непрерывной работы батареи	> 3 часов
Время перезарядки	< 3 часов

Требования к условиям окружающей среды

	Рабочий диапазон	Хранение
Температура	от 0 до +45°C	от -20 до +60°C
Относительная влажность	максимум 95%, без выпадения росы	максимум 95%, без выпадения росы
Высота над уровнем моря	15,240 м	15,240 м

Технические характеристики OTDR серии CMA 4500 (возможен заказ с одной длиной волны)

Оптические опции	25	35	45	54
Тип волокна	одномодовое	одномодовое	одномодовое	одномодовое
Центральная длина волны	1310нм±20нм 1550нм±20нм	1310нм±20нм 1550нм±20нм	1310нм±20нм 1550нм±20нм	1550нм±20нм
Ширина спектра (среднеквадратическое значение)	1310 нм: <15нм 1550 нм: <15нм	1310 нм: <15 нм 1550 нм: <15нм	1310 нм: <15 нм 1550 нм: <15нм	1550 нм: <15нм
Динамический диапазон[1]	1310 нм: 37 дБ 1550 нм: 36 дБ	1310 нм: 40 дБ 1550 нм: 40 дБ	1310 нм: 43 дБ 1550 нм: 45 дБ	1550 нм: 50 дБ
Начальная "мертвая" зона по отражению[2]	1310 нм: 4 м 1550 нм: 3.5 м	1310 нм: 4 м 1550нм:3м	1310 нм: 5 м 1550 нм: 5 м	1550 нм: 5 м
Начальная "мертвая" зона по затуханию[3]	1310 нм: 9 м 1550 нм: 9 м	1310 нм: 8 м 1550 нм: 6 м	1310 нм: Юм 1550 нм: Юм	1550 нм: Юм
Линейность	0.04 дБ/дБ	0.04 дБ/дБ	0.04 дБ/дБ	0.04 дБ/дБ
Длительность импульса	5 не + 20 мкс	5 не -г 20 мкс	5 не т 30 мкс	5 не -г 30 мкс

J Оптические опции	36	46	56	69
Тип волокна	одномодовое	одномодовое	многомодовое (62.5 мкм)	многомодовое (50 мкм)
Центральная длина волны	1310нм±20нм 1550нм±20нм 1625 нм± 15 нм	1310нм±20нм 1550нм±20нм 1625 нм ± 15 нм	850 нм ± 30 нм 1300нм±30нм	850 нм ± 30 нм 1300нм±30нм
1 Ширина спектра (среднеквадратическое значение)	1310 нм: <15 нм 1550 нм: <15нм 1625нм:<15нм	1310 нм: <15нм 1550 нм: <15нм 1625 нм: <15нм	850 нм: <15нм 1300нм: <15нм	850 нм: <15нм 1300нм:<15нм
Динамический диапазон(1)	1310 нм: 40 дБ 1550 нм: 40 дБ 1625 нм: 40 дБ	1310 нм: 43 дБ 1550 нм: 43 дБ 1625 нм: 43 дБ	850 нм: 24 дБ 1300 нм: 26 дБ	850 нм: 24 дБ 1300 нм: 26 дБ
Начальная "мертвая" зона по отражению(2)	1310 нм: 4 м 1550нм:3м 1625 нм: 3 м	1310 нм: 6 м 1550 нм: 5 м 1625 нм: 5 м	850 нм: 2.5 м 1300 нм: 2.5 м	850 нм: 3 м 1300нм:3м
Начальная "мертвая" зона по затуханию(3)	1310 нм: 8 м 1550 нм: 6 м 1625 нм: 6 м	1310 нм: Юм 1550нм: Юм 1625 нм: Юм	850 нм: 5 м 1300 нм: 7 м	850 нм: 5 м 1300 нм: 7 м
Линейность	0.04 дБ/дБ	0.04 дБ/дБ	0.04 дБ/дБ	0.04 дБ/дБ
Ширина импульса(4)	5 не -г 20 мкс	5 не + 30 мкс	5 не + 1 мкс	5 не + 1 мкс
Разрешение по расстоянию	0.00001 км, 0.1 м, 1 фут, 0.0001 мили			
Установка диапазонов расстояния4 (5)	5,20,50,125,250,300 км			
Разрешение по затуханию	0.001 дБ			
Взятие отсчетов по расстоянию4'6 (зависит от диапазона)	0.125,0.25,0.5, 1,2,4,8,16 м			
Количество анализируемых точек рефлектограмм	До 256,000			
Погрешность измерения расстояния	0.0025% от измеренного расстояния разрешение по расстоянию ± неопределенность индекса			
Лазерная безопасность	Соответствует требованиям Класса 1 по МЭК 60825-1 и Класса 1 CDRH (безопасность глаз) 21 CFR 1040			
Оптический соединитель	Универсальный (использует адаптеры UC-130-XX)			

Все технические параметры и характеристики являются объектом изменения без уведомления

[1] SNR=1 с количеством усреднений до 256k (обычно отнимается примерно 2 дБ от диапазона 98% пикового шума. Bellcore TR-TSY-0001 Выпуск 2)

[2] Используется Bellcore TR-TSY-000196 Выпуск 2

[3] "Мертвые" зоны, измеренные на отражениях -45 дБ (типичное значение)

[4] Зависит от длины волны

[5] Диапазон расстояний для оптических опций 66 и 69 составляет 5, 20, 50, 125 км
[6] Величина взятия отсчетов по расстоянию для опций 66 и 69 составляет 0.125, 0.25, 0.5,1, 2, 4, 8 м

Источник оптического излучения (дополнительная опция - устанавливается на заводе)

	Одномодовый режим	Многомодовый режим
Тип	Лазер	Светоизлучающий диод (LED)
Длины волн	Аналогично соответствующему модулю OTDR	850/1300 ± 20 нм
Уровень мощности выходного сигнала	-8 дБм (минимальный)	-25 дБм (минимальный)
Волокно на выходе	Одномодовое 9/125 мкм	Многомодовое 62.5 или 50 мкм
Оптический соединитель	Универсальный (использует адаптеры UC-130-XX)	Универсальный (использует адаптеры UC-130-XX)
Режимы работы	непрерывное излучение (CW), модулированное с частотой 1 кГц и 2 кГц	CW, 1 кГц и 2 кГц
Стабильность[1]	± 0.2 дБ (8 часов)	± 0.2 дБ (8 часов)
Ширина спектра (среднеквадратическое значение)	< 15 нм	<50/<125FWHM
Безопасность	Соответствует требованиям Класса 1 по МЭК 60825-1 и Класса 1 CDRH (безопасность глаз) 21 CFR 1040	

Все технические параметры и характеристики являются объектом изменения без уведомления 1 При температуре+23°C

Измеритель оптической мощности (дополнительная опция - устанавливается на заводе)

Тип детектора	InGaAs
Диапазон длин волн	780- 1800 нм
Диапазон уровня мощности	+20 + -45 дБм
Длины волн калибровки	850,1300,1310, 1550, 1625 нм
Оптический соединитель	Универсальный (использует адаптерные колпачки LP-XX)
Разрешение	0.01 дБ, 0.01% Ban
Режим сохранения опорного значения	Да
Погрешность	4%@+5 + -50дБм 8% @ +10 т -5 дБм и -50 + -55 дБм
Линейность	0.01 дБ, +5 + -55 дБм

Визуальный дефектоскоп (дополнительная опция - устанавливается на заводе)

Длина волны	650 нм ± 20 нм
Уровень мощности выходного сигнала (максимальное значение)	0 дБм в 9/125 мкм
Режим передачи	Непрерывное излучение или модулированное 2 Гц
Выходное волокно	Одчомодовое 9/125 мкм
Оптический соединитель	Универсальный 2.5 мм
Безопасность	Класс II по МЭК 60825-1, FDA (21 CFR 1040.10 Класс 2)

Стандартные принадлежности
Цветной дисплей с сенсорным экраном, руководство пользователя, CD поддержки, Li-Ion батарея (1), Зарядное устройство/адаптер сети переменного тока, порт Ethernet 10/100 и сетевой шнур по выбору
Дополнительные принадлежности (1)

Опция 501CDRW	Внутренний модуль чтения/записи компакт дисков (CD R/W) в CMA 4500
Опция 502FLOPPY	Внутренний модуль дисковода для флоппи-дисков в CMA 4500
Опция 507KEYUS	Клавиатура США для CMA 4500
4500-BATT	Сменная Li-Ion батарея

Опция 511AC	Сменный адаптер/зарядное устройство от сети переменного тока
Опция 515PRINT	Портативный внешний принтер для CMA 4500 с кабелем и сумкой
4500-MANUAL	Запасное руководство пользователя
4500-HCASE	Жесткая транспортная сумка для CMA 4500
4500-SCASE	Мягкая транспортная сумка для CMA 4500
4500-USBKEY	Клавиатура USB с трекболом
45004JSBFLOPPY	Внешний дисковод для флоппи-дисков с подключением к порту USB
4500-USBCDRW	Внешний CD-R/W с подключением к порту USB
4500-EXT1	Расширенная годовая гарантия на CMA 4500
4500-EXГ2	Расширенная двухгодичная гарантия на CMA 4500

[1] Должны добавляться отдельной строкой

Опции, используемые только с настольной моделью CMA 4500
Опция 580DATA
Комплект для переноса данных через USB, включает программное обеспечение и кабель для Windows® 98/2000/XP
Видеомикроскоп, подключаемый через USB (см. подробности в отдельном описании для приложения VIP)
Видеомикроскоп к CMA 4500 похож на выбираемый пользователем микроскоп 200ЩЮХ, который позволяет просматривать оптические соединители, сохранять результаты и проводить анализ (с опцией 546) через порт USBBCMA4500

Опция 545VIP
Пробник USB с базовым программным обеспечением просмотра/сбора данных, FC, SC, ST, 1.25-мм и 2.5-мм наконечник

Опция 545VIPA
Пробник USB с базовым программным обеспечением просмотра/сбора данных и программным обеспечением расширенного анализа, FC, SC, ST, 1.25-мм и 2.5-мм наконечник (флаговая клавиша USB)

YOKOGAWA
Рефлектометр малогабаритный универсальный AQ7260

Модульная конструкция позволяет не только заменять оптические блоки, но и включать в состав прибора принтер, дисковод, дополнительные устройства памяти и т.д. Наличие современного интерфейса USB позволяет подключать стандартные устройства: клавиатуру, внешнюю память, принтер и т.д.

AQ7260 имеет русифицированное меню экранных команд и поставляется с руководством пользователя на русском языке.

Основные характеристики:
• Большой и удобный для просмотра под любым углом экран
• Увеличенная точность измерения расстояний и высокое разрешение считывания (до 1 см)
• Динамический диапазон до 42 дБ, диапазон измеряемых длин трасс до 640 км
• Режим стабилизированного источника излучения
• Увеличенный объем внутренней памяти и возможность подключения дополнительных сменных PCMCIA и USB устройств памяти
• Универсального интерфейс USB для подключения клавиатуры, внешней памяти, принтера и т.д.
• Дополнительный встраиваемый принтер позволяет быстро распечатать рефлектограмму
• Увеличенная скорость проведения измерений

• Возможность сохранения результатов измерения в формате, соответствующему стандарту Telcordia GR-196 (Bellcore)
• Li-Ion батарея, рассчитанная на непрерывную работу прибора в течение 6 ч, с временем подзарядки менее 5 ч
• Портативный дизайн: габариты около 299мм х 225мм х 62 мм, масса всего 3 кг
• Возможность работы при температурах от -10 до +50°С и относительной влажности до 95%

Yokogawa

Технические характеристики: Основной блок

	Дисплей	8,4-дюймовый ЖК цветной дисплей, разрешение 640х480 точек
Горизонтальная ось дисплея	Диапазон просмотра	25м, 50м, 100м, 250м, 500м, 1км, 2.5км, 5км, 10км, 20км, 40км, 80 км, 160 км, 240 км, 320/640км (в зависимости от длины волны)
	Сдвиг шкалы	От 0 до диапазона расстояний
	Разрешение считывания, см	1 (минимальное)
	Число точек в рефлектограмме	до 60 000
	Диапазон группового показателя преломления	1,00000 - 1,99999 с шагом 0,00001
	Измерение расстояний	Расстояние между любыми двумя точками на рефлектограмме отображается в виде восьмизначного числа
Вертикальная ось дисплея	Масштаб по затуханию, дБ/дел	0,2; 0,5; 1; 2; 5; 7.5
	Сдвиг шкалы, дБ	От 0 до 68
	Разрешение считывания, дБ	0,001 (минимальное)
	Измерение потерь	Уровень сигнала отображается в виде пятизначного числа
		Функции измерения потерь на участке волокна, погонного затухания, потерь на локальной неоднородности
	Измерение обратного отражения	Функции измерения коэффициента отражения от локальной неоднородности, полного коэффициента отражения на участке линии
Память	Внутренняя память	20 Мбайт
	PCMCIA	Результаты измерения и настройки могут быть сохранены на дополнительном устройстве памяти, подключаемом через интерфейс PCMCIA
Интерфейсы	USB	2 порта USB 1.0, предназначены для внешней памяти, клавиатуры и принтера
	FDD	Дополнительный встраиваемый дисковод 3,5"
Электропитание	Сетевой адаптер	100-240 В, 50/60 Гц, до 60 Вт (при использовании принтера во время заряда батареи)
	Батарея	Тип: Li-Ion. Продолжительность работы без подзарядки: около 6 часов (30 сек измерения каждые 3 минуты, оптический блок AQ7261 без доп. комплектации в режиме энергосбережения) Продолжительность зарядки: менее 5 часов
Условия	Температура эксплуатации	от -10 до +50°С (во время зарядки батареи: от +5° С до +35°С)
	Температура хранения	от -20°С до +60°С
	Относительная влажность	Не более 95% (без конденсации)
Габариты и масса		Около 299мм х 225мм х 62 мм (Ш х В х Г), около 3 кг
Принадлежности		Батарея, ремень, сетевой адаптер, руководство по эксплуатации

Технические характеристики: Оптические блоки

| Модель	Одномодовый блок AQ7261	Одномодовый блок AQ7264
| Тип волокна	SM 10/125 (ITU-T G.652)	
Длина волны, нм	1310/1550±25	1310/1550±20
Диапазон расстояний, км	2,5, 10,20,40,80, 160, 240 320/6401»	
| Длительность импульса	10нс, 20нс, 50нс, 100нс, 200нс, 500нс, 1мкс, 4мкс, Юмкс, 20мкс, 50мкс2>	
Разрешение выборки	5 см, минимальное	
Число точек в выборке	до 60 000	
Погрешность измерения длин	±(1 м + 2 х 10'5 х измеряемая длина (м) + разрешение выборки)	
Погрешность измерения потерь (нелинейность)	±0,05 дБ/дБ	

Мертвая зона	По отражению (разрешение) 3>	2 м (типично)	2 м (типично)
	По потерям4)	15/20 м (типично)	7/8 м (типично)
Динамический диапазон (С/Ш=1)5),дБ		34/32 35/33 (типично)	40/38 42/40 (типично)
Режим стабилизи-рованного излучения	Длина волны, нм	-	1310/1550
	Максимальная выходная мощность, дБм		-3±2
	Стабильность, дБ6>		±0,1
Оптический разъем		оптический адаптер AQ9441 FC7'	
Условия хранения и эксплуатации	Температура эксплуатации	от-10до+50°С	
	Температура хранения	от -20°С до +60°С	
	Относительная влажность	Не более 95% (без конденсации)	

Примечания:
1 - 320 км для длины волны 1310 нм, 640км для длины волны 1550 нм
2 - Длительность импульса 50мкс доступна только для оптического блока AQ7264
3 - Длительность импульса 10 не, уровень обратного отражения -40 дБ
4 - Длительность импульса 10 не, уровень обратного отражения -45±0,5 дБ
5 - С/Ш=1, 3 мин, длительность импульса 20 мке
6 - В течении 5 минут при постоянной температуре окружающей среды
7 - По заказу могут быть установлены оптические адаптеры SC, ST, DIN.